

UNIVERZITET U BEOGRADU
MATEMATIČKI FAKULTET



Nemanja Spasojević

SIMULACIJA DETEKCIJA MEĐUZVEZDANIH
ASTEROIDA I KOMETA U OKVIRU
PREGLEDA NEBA OPSERVATORIJE RUBIN

master rad

Beograd, 2026.

Mentor:

dr Dušan MARČETA, docent
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

Članovi komisije:

dr Anđelka KOVAČEVIĆ, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

dr Bojan NOVAKOVIĆ, docent
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

dr Marija JANKOVIĆ, viši naučni saradnik
Institut za fiziku

Datum odbrane: _____

*Mom bratu Aleksi, kome sam mesecima beskrupulozno
uskraćivao zajedničko igranje igrica dok sam planirao,
pripremao i pisao ovaj rad.*

Naslov master rada: Simulacija detekcija međuzvezdanih asteroida i kometa u okviru pregleda neba Opservatorije Rubin

Rezime: Broj poznatih međuzvezdanih objekata još uvek je premali da bi osobine njihove populacije bile pouzdano određene. Očekuje se da će pregled neba Legacy Survey of Space and Time (LSST) Opservatorije Vera Rubin znatno povećati broj poznatih međuzvezdanih objekata, ali će buduće detekcije biti pod uticajem selekcionih efekata samog pregleda. Za njihovo tumačenje zato je potrebno modelovati kako se osobine intrinzične populacije preslikavaju u osobine objekata koje će LSST otkriti.

U ovom radu razvijen je okvir za simuliranje detektabilnosti sintetičkih populacija međuzvezdanih objekata u okviru pregleda neba LSST. Postojeći probabilistički generator proširen je tako da omogućava generisanje stacionarne populacije tokom proizvoljnog vremenskog intervala, kao i korišćenje empirijskih kinematičkih raspodela. Generisane populacije zatim su korišćene kao ulaz za simulator pregleda neba SORCHA. Ispitan je uticaj raspodele veličina, fotometrijskih osobina i kinematičkog sastava populacije na očekivani broj i osobine otkrivenih objekata tokom prve godine ovog pregleda.

Za usvojenu referentnu brojnu gustinu od 0.1 au^{-3} za objekte prečnika većeg od 100 m, simulacije neaktivnih populacija uglavnom daju najviše nekoliko objekata tokom prve godine LSST-a, dok je u velikom delu ispitanog prostora parametara moguće i potpuni izostanak detekcija. Za aktivne objekte sa prečnikom jezgra $D \geq 200 \text{ m}$ tipične prognoze su reda nekoliko do nekoliko desetina objekata, uz snažnu zavisnost od usvojenog modela kometarne aktivnosti i raspodele veličina. Simulacije takođe ukazuju na veću detektabilnost objekata sa kinematikom tankog diska u odnosu na objekte debelog diska i galaktičkog haloa. Pokazano je i da efikasnost detekcije i povezivanja brzo pokretnih objekata može značajno uticati na konačan broj otkrića. Selekcioni efekti zato utiču ne samo na broj otkrivenih objekata, već i na raspodele njihovih osobina.

Ključne reči: međuzvezdani objekti, LSST, SORCHA, galaktička kinematika, selekcioni efekti

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Međuzvezdani objekti i njihov naučni značaj	1
1.2	Dosadašnja otkrića	2
1.3	LSST i budućnost istraživanja međuzvezdanih objekata	3
1.4	Motivacija i ciljevi rada	5
2	Generisanje sintetičke populacije međuzvezdanih objekata	8
2.1	Probabilistički generator sintetičke populacije	8
2.2	Ograničenja generatora trenutne (snapshot) populacije međuzvezdanih objekata	10
2.3	Implementacija stacionarne populacije	11
2.4	Uvođenje empirijske kinematike	13
2.5	Galaktičke populacije i mešoviti kinematički modeli	14
2.6	Praktične posledice unapređenja generatora	16
3	Simulacija LSST posmatranja pomoću simulatora Sorch	18
3.1	Sorch simulator pregleda neba	18
3.2	Ulazni podaci i tok simulacije	19
3.3	Modelovanje populacije međuzvezdanih objekata	22
	Neaktivni objekti i modeli albeda	23
	Aktivni objekti i modeli kometarne aktivnosti	24
3.4	Model LSST pregleda i kriterijumi detekcije	25
	Raspodela posmatranja	26
	Model vidnog polja i pojedinačne detekcije	27
	Efekat razmazivanja signala	28
	Kriterijumi otkrića	28
3.5	Automatizovano izvršavanje simulacija	29

3.6	Izlazni podaci	31
4	Rezultati i diskusija	32
4.1	Očekivani broj otkrića	32
4.2	Uticaj nagiba SFD-a na LSST detektabilnost	36
4.3	Uticaj albeda i kometarne aktivnosti na LSST detektabilnost	40
4.4	Uticaj kinematičkog sastava populacije na LSST detektabilnost	44
4.5	Selekcione pristrasnosti LSST pregleda neba	52
	Selekcija prema veličini i kinematici	53
	Orbitalna i posmatračka geometrija	57
	Vremenski raspon detekcija i brzo prividno kretanje objekata	60
4.6	Ograničenja modela i izvori neizvesnosti	64
5	Zaključak	67
	Literatura	70

Glava 1

Uvod

1.1 Međuzvezdani objekti i njihov naučni značaj

Međuzvezdani objekti (engl. *Interstellar Objects*, ISO) su nebeska tela koja nisu gravitaciono vezana za svoju matičnu zvezdu, već se po galaktičkim putanjama kreću kroz međuzvezdani prostor. Analogno malim telima Sunčevog sistema, ISO se prema prisustvu kometarne aktivnosti mogu podeliti na neaktivne, asteroidalne objekte i na aktivne međuzvezdane komete.

Pretpostavlja se da su ova tela nastala na isti način kao i mala tela Sunčevog sistema, agregacijom čestica prašine iz protoplanetarnog diska oko matične zvezde u planetesimale. Gravitaciono rasejanje usled bliskih prilaza masivnim telima ove objekte može izbaciti iz gravitacione kontrole matične zvezde i poslati ih na putanje kroz međuzvezdani prostor. U slučaju Sunčevog sistema, procenjuje se da je približno 90–99% kometa koje su rasute tokom formiranja njegovih spoljašnjih delova izgubljeno u međuzvezdanom prostoru, dok je samo manji deo ostao u Ortovom oblaku [16]. Ako pretpostavimo da ovaj mehanizam slično funkcioniše i u drugim planetarnim sistemima širom naše galaksije, brzo nam postaje jasno da je međuzvezdani prostor pun slobodno lutajućih planetesimala koji su se otrgli gravitaciji svojih zvezda.

Ipak, do pre deset godina, postojanje ovih objekata je bilo samo teorijska spekulacija. Tek je 2017. godine detektovan i potvrđen jedan objekat koji vodi poreklo iz drugog zvezdanog sistema. Ovaj objekat, nazvan 1I/'Oumuamua, probudio je interesovanje za istraživanje međuzvezdanih objekata. Analiziranje fizičkih i hemijskih karakteristika ovih objekata može pružiti neposredne informacije o uslovima u kojima su nastali, procesima formiranja i evolucije njihovih matičnih planetarnih

sistema i mehanizmima kojima su iz njih izbačeni [16, 18].

Nažalost, kako je čovečanstvo do danas bilo u prilici da privremeno posmatra samo tri ovakva objekta, do sada je ovo izučavanje uglavnom ostalo na nivou teorijskih modela i numeričkih simulacija. Ipak, ova tri međusobno veoma različita objekta pokazala su da ISO populacija može biti fizički i hemijski izrazito raznovrsna, što početak rada Opservatorije Vera Rubin i njenog pregleda neba LSST (engl. *Legacy Survey of Space and Time*) čini još značajnijim. Očekuje se da će LSST znatno povećati broj poznatih međuzvezdanih objekata i omogućiti bolje ograničavanje osobina njihove populacije, kao što su funkcija raspodele po veličinama i kinematička raspodela [16, 19].

1.2 Dosadašnja otkrića

Otkriće prvih međuzvezdanih objekata ukazuje na postojanje ogromne galaktičke populacije, procenjene na 10^{25} do 10^{26} sličnih tela u Mlečnom putu. Procenjuje se da je prostorna gustina ovakvih objekata u okolini Sunca oko 0.1 au^{-3} [16].

Prvi potvrđeni međuzvezdani objekat, 1I/'Oumuamua, otkriven je u oktobru 2017. godine od strane Pan-STARRS projekta [24]. Objekat je detektovan tek nakon prolaska kroz perihel, dok je velikom brzinom napuštao Sunčev sistem [24], i na svim posmatranjima je izgledao kao tačkasti izvor, bez ikakvih tragova kometarne kome ili izbacivanja gasa i prašine [16]. Iako se 'Oumuamua usled odsustva vidljive aktivnosti obično kategorizuje kao neaktivan i asteroidalan, putanja objekta je pokazivala značajno negravitaciono ubrzanje [16], čiji je uzrok i dalje nepoznat. Takođe, ovaj objekat je pokazao ekstremno veliku amplitudu u promeni sjaja, što ukazuje na veoma izdužen ili spljošten oblik, sa razmerom osa od oko 6:1 [16]. Njegov poluprečnik se procenjuje na između 55 i 114 metara [16].

Drugi otkriveni međuzvezdani objekat, 2I/Borisov, predstavlja prvu potvrđenu međuzvezdanu kometu [24]. Za razliku od objekta 'Oumuamua, 2I/Borisov je pokazao jasnu kometarnu aktivnost [16]. Ono što ovaj objekat izdvaja od velike većine kometa Sunčevog sistema jeste njegov specifičan hemijski sastav. Spektroskopska merenja pokazala su da je 2I/Borisov izuzetno obogaćen ugljen-monoksidom (CO), sa izmerenim odnosom stopa produkcije $Q(\text{CO})/Q(\text{H}_2\text{O}) \geq 1$ u periodu nakon prolaska kroz perihel [24]. S obzirom na to da je prosečan odnos CO i H_2O u kometama Sunčevog sistema svega oko 4%, ova anomalija ukazuje na to da je 2I/Borisov formiran u veoma hladnom okruženju, i to verovatno izvan linije smrzavanja CO u

svom matičnom protoplanetarnom disku [16, 24]. Poluprečnik njegovog jezgra je procenjen na između 200 i 500 metara [16].

U julu 2025. godine, pregled neba ATLAS je detektovao i treći međuzvezdani objekat, označen kao 3I/ATLAS. Ovaj objekat je pokazao kometarnu aktivnost u vidu kompaktne kome [25]. Nakon posmatranja pomoću svemirskog teleskopa Džejms Veb (JWST), otkriveno je da je koma ovog objekta pre perihela bila izuzetno bogata ugljen-dioksidom, sa odnosom mešanja $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O} = 7.6 \pm 0.3$. Ova vrednost je približno 18 puta veća od one koja se očekuje za komete Sunčevog sistema na sličnoj udaljenosti [6]. Posmatranja nakon perihela pokazala su značajan pad odnosa $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$, a CO je postao dominantan u odnosu na CO_2 i H_2O . U odnosu na posmatranja pre prolaska kroz perihel, odnos CO/CO_2 povećao se za približno faktor 10 [5].

Kada su u pitanju znatno manji objekti, iako veće čestice teorijski mogu proizvesti detektabilne međuzvezdane meteore, njihova pouzdana identifikacija je izuzetno teška [16]. Iako postoje potencijalne detekcije ovakvih tela, planetarne perturbacije mogu preusmeriti lokalne objekte na hiperbolične putanje, pa su nedavne tvrdnje o detekciji međuzvezdanih meteora u postojećim bazama podataka uglavnom osporene zbog lošeg kvaliteta podataka i neprijavljivanja mernih grešaka [16, 23].

Sve u svemu, prva tri potvrđena međuzvezdana objekta pokazala su međusobno različite fizičke i hemijske karakteristike, koje često izlaze iz okvira očekivanih vrednosti za tela Sunčevog sistema. Ipak, uzorak od tri objekta je i dalje suviše mali za donošenje pouzdanih statističkih zaključaka o karakteristikama ogromne i očigledno heterogene populacije ovih objekata.

Shodno tome, u ovom radu će biti simulirane i analizirane populacije koje obuhvataju različite moguće kombinacije trenutno slabo poznatih parametara, uključujući nagib funkcije raspodele po veličinama, albedo ili model kometarne aktivnosti, kao i kinematičke karakteristike populacije. Kada Opservatorija Vera Rubin bude detektovala svoje prve međuzvezdane objekte, rezultati ovog rada mogu poslužiti kao okvir da se preciznije odredi mogući opseg ovih nepoznatih parametara.

1.3 LSST i budućnost istraživanja međuzvezdanih objekata

Opservatorija Vera Rubin projektovana je prvenstveno za sprovođenje desetogodišnjeg pregleda neba Legacy Survey of Space and Time (LSST), koji predstavlja

jedan od najambicioznijih optičkih pregleda neba do sada. LSST je zvanično započeo 29. juna 2026. godine, pa će krajem juna 2027. rezultati ovog rada moći neposredno da se porede sa ishodom prve godine stvarnog pregleda neba. Simulacije u ovom radu, međutim, zasnovane su na jednogodišnjoj preoperativnoj realizaciji strategije posmatranja, a ne na stvarnoj prvoj godini rada LSST-a, što je detaljnije opisano u sekciji 3.4. Teleskop ove opservatorije, Simonyi Survey Telescope, opremljen je primarnim ogledalom prečnika 8.4 m (efektivno 6.5 m) i najvećom ikada napravljenom digitalnom kamerom, rezolucije od čak 3.2 gigapiksela. Teleskop ima vidno polje od 9.6 kvadratnih stepeni i snimanja se vrše u šest fotometrijskih filtera (u, g, r, i, z, y). Očekuje se da dubina pojedinačnog posmatranja u r filtru dostigne graničnu magnitudu od $r \sim 24.5$ za tačkaste izvore na nivou detekcije od 5σ . Važna karakteristika teleskopa je i njegov optički zahvat (*étendue*), koji predstavlja proizvod površine njegovog ogledala i površine njegovog ugaonog vidnog polja, a koji određuje brzinu kojom pregled može snimiti veliku oblast neba do željene dubine. Sa optičkim zahvatom od približno $319 \text{ m}^2 \text{ deg}^2$, LSST se nalazi za red veličine iznad ostalih pregleda neba [15].

Ovi impresivni tehnički parametri, između ostalog, čine LSST posebno pogodnim za otkrivanje međuzvezdanih objekata. Za razliku od dosadašnjih pojedinačnih i slučajnih otkrića, Opservatorija Vera Rubin trebalo bi da omogući redovno i sistematsko otkrivanje novih ISO. O značaju i mogućnostima ovog pregleda neba govori i činjenica da je naknadnom analizom snimaka utvrđeno da je Opservatorija Rubin zabeležila 3I/ATLAS deset dana pre njegovog zvaničnog otkrića [3]. Ipak, broj i osobine objekata koje će LSST detektovati snažno će zavisi od trenutno slabo poznate lokalne brojne gustine ovih objekata, njihove funkcije raspodele po veličinama, njihovih fotometrijskih odlika, specifičnosti njihove kometarne aktivnosti i njihovih kinematičkih odlika. Procene očekivanog broja otkrića, pored ovih nepoznatih osobina ISO populacije, u obzir moraju uzeti i ograničenja i selekzione efekte samog LSST pregleda neba [4, 7, 19].

Poseban problem predstavljaju ISO sa velikim prividnim ugaonim brzinama. Velika ugaona brzina rezultuje problemom razmazivanja signala duž detektora (engl. *trailing loss*), smanjujući odnos signala i šuma (SNR), i samim tim i efikasnost detekcije [7, 20, 22]. Velike ugaone brzine takođe otežavaju povezivanje detekcija iz istih ili različitih noći, jer povećavaju oblast unutar koje se za svaku detekciju traže potencijalna povezivanja. Poluprečnik ove oblasti raste linearno, a njena površina kvadratno sa maksimalnom dozvoljenom ugaonom brzinom. Zbog toga povećavanje

dozvoljenog opsega brzina dovodi do kombinatorne eksplozije broja mogućih parova, kao i do povećanja vremenskih i memorijskih zahteva postupka [17]. Značaj ovog problema ilustruje 1I/'Oumuamua, čija je prividna ugaona brzina u vreme otkrića iznosila približno 6.2 deg day^{-1} [22], što bi potencijalno moglo predstavljati problem prilikom automatizovane obrade podataka o detekcijama.

Pošto se maksimalna dozvoljena ugaona brzina u praktičnim implementacijama može ograničiti iz ovih razloga, standardna automatska obrada LSST podataka neće nužno obuhvatiti čitav opseg prividnih brzina koje međuzvezdani objekti mogu imati [7]. Različita ispitivanja LSST sistema za povezivanje detekcija koristila su različite operativne granice. U jednom od ranijih testova starijeg MOPS (*Moving Object Processing System*) sistema je, zbog računarskih ograničenja, pri formiranju trackleta, odnosno povezivanju dve ili više detekcija istog pokretnog objekta tokom jedne noći, korišćena gornja granica ugaone brzine od 0.5 deg day^{-1} [17]. U drugom ispitivanju istog sistema su obuhvaćeni objekti brzine do 2.0 deg day^{-1} , pri čemu su za najbrže objekte korišćene informacije o dužini i orijentaciji njihovih tragova radi smanjenja oblasti pretrage i broja lažnih povezivanja [27]. Od tada je LSST prešao na novi sistem za povezivanje, zasnovan na algoritmu HelioLinC3D, koji je korišćen za Rubin Data Preview 1. Tada je korišćena gornja granica od 1.5 deg day^{-1} [26]. Takođe, za najbrže objekte su razmatrani i namenski algoritmi i alternativni kriterijumi otkrića [7, 17, 22], ali njihova buduća efikasnost još nije poznata.

Zbog toga će se ovaj rad primarno baviti standardnim kriterijumima detekcije i koristiti filter povezivanja (linking filter) implementiran u simulatoru pregleda Sunčevog sistema *Sorcha* [20], ali će dodatno razmotriti i scenario sa već spomenutom gornjom granicom prividne ugaone brzine od 1.5 deg day^{-1} . Bitno je napomenuti da se ova vrednost u ovom radu ne tumači kao trajna granica LSST-a, već kao konkretna i već primenjena vrednost koja može poslužiti za procenu uticaja ovakvog ograničenja na broj otkrivenih objekata, što će biti detaljnije razmotreno u glavi 4.

1.4 Motivacija i ciljevi rada

Međuzvezdani objekti koje će Opservatorija Vera Rubin detektovati neće predstavljati nepristrasnu sliku stvarne galaktičke populacije ovih objekata. Kako verovatnoća detekcije pojedinačnog objekta zavisi od njegovih fizičkih, fotometrijskih i dinamičkih karakteristika, uključujući veličinu, albedo, kometarnu aktivnost, brzinu i geometriju prolaska kroz Sunčev sistem, skup detektovanih objekata će nužno

biti pristrasan ka velikim, svetlim i sporim objektima, a zapostaviće najmanje, najtamnije i najbrže članove ove populacije. Pored toga, na skup otkrivenih objekata će uticati i osobine samog pregleda neba, kao što su njegova granična magnituda, raspodela posmatranja i efikasnost detekcije brzih objekata [4, 7, 19].

Zbog toga se zaključci o intrinzičnim osobinama ISO populacije neće moći pouzdano doneti isključivo na osnovu osobina detektovanih objekata, jer oni neće biti reprezentativni za čitavu populaciju. Kao rešenje tog problema, ovaj rad primenjuje direktno modelovanje (forward modeling) u okviru kog se generišu sintetičke populacije sa različitim pretpostavljenim osobinama, a zatim se njihova posmatranja simuliraju pomoću softverskog paketa SORCHA. Na ovaj način moguće je ispitati kako se različiti modeli populacije preslikavaju u očekivani skup LSST detekcija, a takođe i kvantifikovati posmatračke pristrasnosti samog pregleda neba [7, 19].

S tim ciljem, u ovom radu su simulirane populacije sa različitim nagibima raspodele veličina (*size-frequency distribution*, SFD), različitim fotometrijskim osobinama i različitim kinematičkim modelima. Za neaktivne objekte razmatrani su modeli sa tri konstantne vrednosti albeda, kao i empirijski model zasnovan na raspodeli albeda kod Jupiterovih trojanaca. Za aktivne objekte korišćeno je više modela kometarne aktivnosti. Kinematika objekata modelovana je na osnovu brzina obližnjih zvezda iz kataloga Gaia, pri čemu su zasebno razmatrane populacije koje odgovaraju tankom disku, debelom disku i galaktičkom halou, kao i njihove međusobne kombinacije.

Da bi ovakav skup simulacija bio računarski izvodljiv, postojeći probablistički generator sintetičkih ISO populacija [18] proširen je na dva ključna načina. Prvo, uvedena je mogućnost generisanja stacionarne populacije tokom zadatog vremenskog intervala, čime se izbegava generisanje velikog broja objekata koji nikada ne ulaze u posmatranu zapreminu, što je donelo značajno ubrzanje i omogućilo generisanje velikog broja populacija neophodnih za ovaj rad. Nakon toga, generator je prilagođen za korišćenje proizvoljnih empirijskih kinematičkih raspodela, umesto unapred zadate analitičke Švarcsildove raspodele, čime je omogućeno ispitivanje uticaja različitih empirijskih kinematičkih raspodela na detektabilnost ISO, kao i na karakteristike detekcija. Tako generisane populacije zatim su korišćene kao ulaz za simuliranje LSST posmatranja pomoću simulatora SORCHA.

Shodno tome, glavni cilj rada je uspostavljanje računski efikasnog i fizički motivisanog okvira za procenu broja i osobina međuzvezdanih objekata koje bi LSST mogao da otkrije tokom prve godine pregleda. Specifični ciljevi rada su:

1. generisanje sintetičkih ISO populacija sa različitim pretpostavljenim raspode-

- lama veličina, fotometrijskim osobinama i kinematikom;
2. simuliranje njihovih posmatranja u realističnim uslovima pregleda LSST pomoću simulatora Sorchia;
 3. ispitivanje zavisnosti očekivanog broja otkrića od SFD-a, albeda, kometarne aktivnosti i galaktičkog porekla objekata;
 4. identifikovanje i kvantifikovanje najvažnijih selekcionih efekata koji menjaju odnos između intrinzične i detektovane populacije.

U glavi 2 je opisan proces probabilističkog generisanja sintetičkih populacija međuzvezdanih objekata u skladu sa modelom iz rada Marčeta [18], kao i implementacija dve ključne modifikacije tog modela koje su korišćene za dobijanje rezultata ovog rada. U glavi 3 objašnjena je metodologija simulacije LSST pregleda neba kroz softverski paket Sorchia, kao i izabrani modeli i pretpostavke korišćene za dobijanje sintetičkih LSST detekcija. Na kraju, u glavi 4 biće prikazani rezultati simulacija, očekivani broj detekcija međuzvezdanih objekata za različite parametre populacija tokom prve godine pregleda neba Opservatorije Vera Rubin, analiza zavisnosti broja detekcija od tih parametara, kao i analiza posmatračke pristrasnosti LSST.

Glava 2

Generisanje sintetičke populacije međuzvezdanih objekata

Rezultati ovog rada dobijeni su korišćenjem modifikovane verzije probabilističkog generatora sintetičke populacije međuzvezdanih objekata opisanog u radu Marčeta [18]. Za zadate parametre populacije, ovaj generator efikasno formira realistične sintetičke populacije ISO unutar proizvoljne heliocentrične sfere.

2.1 Probabilistički generator sintetičke populacije

Ranije korišćeni dinamički metodi generisanja populacija međuzvezdanih objekata zahtevali su generisanje i propagiranje velikog broja početnih objekata, od kojih samo mali deo ikada ulazi u posmatranu zapreminu, pri čemu većina bude odbačena. Probabilistički metod direktno uzorkuje orbite samo onih objekata koji čine željenu sintetičku populaciju. Na taj način se izbegava numerička propagacija ogromne početne populacije, što značajno smanjuje procesorsko vreme potrebno za generisanje željenih objekata [18].

Osnovu ovog metoda predstavlja zajednička funkcija gustine verovatnoće šest parametara koji određuju položaj i orbitu međuzvezdanog objekta:

$$p_6 = p(r, v_\infty, B, l, b, \varphi), \quad (2.1.1)$$

gde je r heliocentrično rastojanje objekta, v_∞ njegova hiperbolička ekscesna brzina, B udarni parametar (rastojanje vektora brzine u beskonačnosti od Sunca), l i b određuju pravac vektora brzine u galaktičkom koordinatnom sistemu, dok φ određuje orijentaciju orbitalne ravni. Ovi parametri se uzorkuju metodom multivarijantne

GLAVA 2. GENERISANJE SINTETIČKE POPULACIJE MEĐUZVEZDANIH OBJEKATA

inverzne transformacije (*multivariate inverse transform sampling*), a zatim se na osnovu njih računaju heliocentrični orbitalni elementi objekata [18].

Raspodele iz kojih se ove vrednosti uzorkuju su izvedene direktno iz fluksa međuzvezdanih objekata kroz sferne ljuske oko Sunca. Zbog toga generator prirodno uzima u obzir uticaj Sunčeve gravitacije, pre svega gravitaciono fokusiranje, koje povećava gustinu sporijih objekata u unutrašnjim delovima Sunčevog sistema. Detaljno izvođenje odgovarajućih funkcija raspodele i opis postupka uzorkovanja dati su u radu Marčeta [18].

Korisnik generatoru zadaje ulazne parametre kao što su poluprečnik posmatrane sfere, međuzvezdana brojna gustina objekata, dozvoljeni opseg brzina objekata i parametri Švarcšildove raspodele. Ukoliko se generišu i prečnici objekata, zadaju se i referentni prečnik, granice intervala veličina i odgovarajući nagib raspodele objekata po veličinama (SFD). Izlaz iz generatora čine orbitalni elementi i prečnici svih generisanih objekata.

Kada su zadati parametri funkcije raspodele po veličinama, generator svakom objektu dodeljuje i prečnik uzorkovan iz odgovarajuće SFD. U ovom radu korišćena je kumulativna stepena raspodela oblika

$$n(> D) = n_0 \left(\frac{D}{D_{\text{ref}}} \right)^\alpha, \quad (2.1.2)$$

gde je $n(> D)$ brojna gustina objekata prečnika većeg od D , n_0 brojna gustina objekata većih od referentnog prečnika D_{ref} , dok α predstavlja nagib kumulativne raspodele.

Za sve populacije usvojene su vrednosti $D_{\text{ref}} = 100 \text{ m}$ i $n_0 = 0.1 \text{ au}^{-3}$. Prečnici objekata generisani su u intervalu od 10 m do 100 km, pri čemu je za svaku populaciju korišćen jedan nagib kroz čitav interval. Razmatrano je šest vrednosti

$$\alpha = -1.5, -2.0, -2.5, -3.0, -3.5, -4.0. \quad (2.1.3)$$

Na taj način ispitan je uticaj različitog relativnog udela malih i velikih objekata, dok su referentni prečnik i brojna gustina ostali isti u svim simulacijama.

U originalnoj verziji, za raspodelu vektora brzina ISO korišćen je Švarcšildov elipsoid brzina u odnosu na lokalni standard mirovanja (LSR). Ova raspodela zadavana je preko disperzija komponenti brzine, devijacije verteksa, asimetričnog zaostajanja i brzine Sunca u odnosu na LSR. Sam probabilistički metod nije ograničen na Švarcšildovu raspodelu, ali je ona u originalnoj implementaciji predstavljala način zadavanja kinematike populacije [18].

Za potrebe ovog rada originalni generator je proširen na dva ključna načina. Uvedena je mogućnost generisanja populacije koja ostaje stacionarna tokom zadatog vremenskog intervala, kao i mogućnost direktnog korišćenja empirijskih kinematičkih raspodela umesto isključivo analitičkog Švarcšildovog modela. Motivacija za ove izmene i njihova implementacija biće detaljno prodiskutovani u nastavku ove glave.

2.2 Ograničenja generatora trenutne (snapshot) populacije međuzvezdanih objekata

Iako je ovaj generator značajno ubrzao proces generisanja sintetičkih populacija međuzvezdanih objekata, on je u originalnoj verziji generisao populaciju unutar zadate heliocentrične sfere u jednom određenom trenutku u vremenu. Ovakva trenutna, *snapshot* populacija, sama po sebi nije pogodna za simuliranje pregleda neba koji traje duži vremenski period.

Međuzvezdani objekti nisu statični, i nakon početka njihove propagacije, oni postepeno napuštaju heliocentričnu sferu unutar koje su smešteni. Kako novi objekti ne ulaze u nju, broj objekata u sferi vremenom opada. U slučajevima kada želimo da pratimo objekte unutar sfere u nekom dužem vremenskom intervalu, potrebno nam je da imamo stacionarnu populaciju ISO sa konstantnim dolaznim fluksom.

Jedan način da se ovo prevaziđe je da se na početku generišu objekti u značajno većoj sferi (r_{gen}), čiji je poluprečnik značajno veći od poluprečnika sfere koju zapravo želimo da posmatramo (r_{obs}), i koji je dovoljno veliki da obuhvati i sve objekte sposobne da tokom željenog vremenskog intervala uđu unutar r_{obs} . Za željeni vremenski interval, odnosno trajanje simulacije T , i najveću dozvoljenu brzinu v_{max} koju neki međuzvezdani objekat može imati, potreban poluprečnik početne sfere se može grubo proceniti kao

$$r_{\text{gen}} = r_{\text{obs}} + v_{\text{max}}T. \quad (2.2.1)$$

A odnos dodatne generisane zapremine i zapremine koju zaista želimo da posmatramo iznosi

$$\frac{V_{\text{gen}} - V_{\text{obs}}}{V_{\text{obs}}} = \left(\frac{r_{\text{gen}}}{r_{\text{obs}}} \right)^3 - 1 = \left(1 + \frac{v_{\text{max}}T}{r_{\text{obs}}} \right)^3 - 1. \quad (2.2.2)$$

Ovaj odnos pokazuje da procesorsko vreme potrebno za generisanje stacionarnih populacija sa konstantnim fluksom na ovaj način raste veoma brzo sa trajanjem

GLAVA 2. GENERISANJE SINTETIČKE POPULACIJE MEĐUZVEZDANIH OBJEKATA

simulacije, posebno za male vrednosti r_{obs} . Kao ilustrativan primer, ukoliko bi se simuliralo deset godina pregleda neba Opservatorije Vera Rubin, a pratila sfera poluprečnika $r_{\text{obs}} = 10 \text{ au}$, uz najveću brzinu objekata od $v_{\text{max}} = 100 \text{ km s}^{-1}$, objekat bi tokom tog intervala mogao da pređe približno 210 au. Bilo bi zato potrebno generisati početnu populaciju unutar sfere poluprečnika od približno 220 au, pa bi odnos dodatne i posmatrane zapremine iznosio

$$\frac{V_{\text{gen}} - V_{\text{obs}}}{V_{\text{obs}}} = \left(\frac{220}{10}\right)^3 - 1 = 10647. \quad (2.2.3)$$

Kako velika većina dodatno generisanih objekata neće ući u posmatranu sferu, ovo nam govori da, u navedenom slučaju, generišemo približno 10^4 puta veću populaciju nego što nam je neophodno. Ovaj primer služi samo za ilustraciju skaliranja problema, dok su simulacije predstavljene u ovom radu obuhvatile prvu godinu LSST pregleda. Za posmatrane sfere većih poluprečnika ovaj odnos opada, dok za manje poluprečnike raste. Pošto se u ovom radu koriste sfere različitih poluprečnika, nepotrebno generisanje objekata i dalje predstavlja značajan problem. Efikasniji način modelovanja stacionarne populacije omogućava da se raspoloživi resursi iskoriste za ispitivanje većeg broja različitih nezavisnih populacija.

2.3 Implementacija stacionarne populacije

Kako bismo rešili problem generisanja nepotrebno mnogo objekata u slučaju kada želimo da određena sfera ima relativno konstantan broj objekata unutar sebe u svakom trenutku, generator je unapređen tako da, pored početne *snapshot* populacije, može računski jeftino da generiše samo onoliko objekata koliko je određeno očekivanim dolaznim fluksom tokom željenog trajanja posmatranja, i da ih prostorno rasporedi na način koji će omogućiti približno konstantan dolazni fluks.

Nova verzija generatora prima parametar T , koji predstavlja trajanje perioda stacionarnosti. Za $T = 0$ generator radi identično kao originalna verzija i vraća *snapshot* populaciju. Kada je $T > 0$, ovoj populaciji se dodaju i objekti koji će tokom vremenskog intervala T ući u sferu. Broj ovih dodatnih objekata određuje se na osnovu očekivanog fluksa međuzvezdanih objekata kroz granicu sfere. Pri računanju fluksa uzimaju se u obzir brojna gustina populacije, raspodela brzina i pravaca njihovog kretanja, udarni parametri, kao i gravitaciono fokusiranje pod dejstvom Sunca. Ukupan očekivani fluks F dobija se integracijom po dozvoljenim brzinama, pravcima dolaska i udarnim parametrima objekata koji mogu da preseku

GLAVA 2. GENERISANJE SINTETIČKE POPULACIJE MEĐUZVEZDANIH OBJEKATA

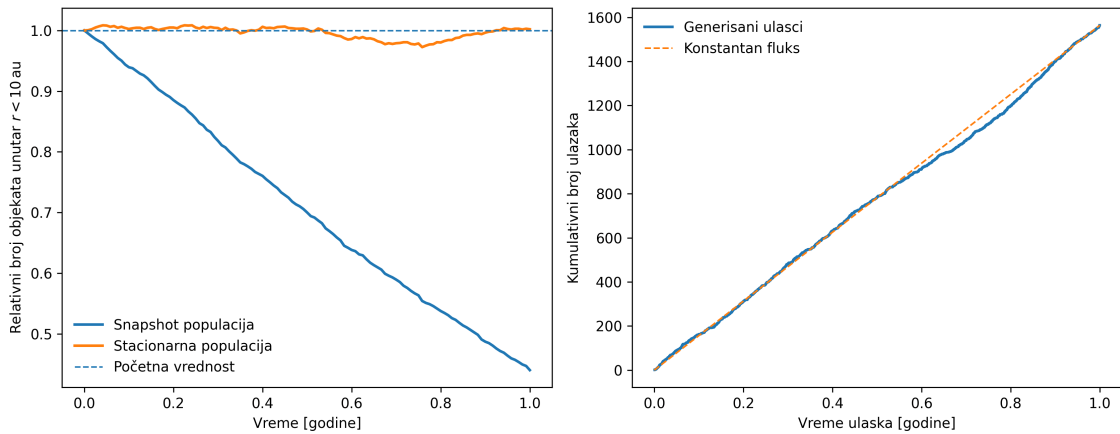
granicu sfere [18]. Očekivani broj objekata koji će tokom intervala T ući u sferu zatim iznosi

$$N_{ul} = \lfloor FT \rfloor. \quad (2.3.1)$$

Osobine dodatnih objekata uzorkuju se iz iste raspodele fluksa. Na taj način se brzine, pravci dolaska i udarni parametri koji više doprinose stvarnom fluksu češće pojavljuju i u generisanoj populaciji. Na osnovu njih se zatim računaju odgovarajući orbitalni elementi svih objekata.

Svakom dodatnom objektu ravnomerno se dodeljuje vreme ulaska u sferu, koje se nalazi unutar intervala od početne epohe do vremena T . Njihove orbite se potom propagiraju unazad od trenutka prelaska granice sfere do početne epohe. Na taj način se određuje početni položaj objekata izvan sfere, pri čemu je zagarantovano da će svi oni ući u nju u određenom trenutku.

Konačna sintetička populacija sastoji se od objekata koji se već nalaze unutar sfere na početku simulacije i od objekata koji će u nju naknadno ući. Pošto su vremena ulaska ravnomerno raspoređena kroz čitav posmatrani interval, dobija se konstantan očekivani dolazni fluks, jer se objekti koji napuštaju sferu efektivno zamenjuju novim objektima. Na taj način populacija ostaje približno stacionarna, što je prikazano na slici 2.1.



Slika 2.1: Validacija modela stacionarne populacije tokom jednogodišnjeg intervala. Levo je prikazana promena broja objekata unutar $r < 10$ au, normalizovana na početnu vrednost, za originalnu *snapshot* i stacionarnu populaciju. Desno je prikazan kumulativni broj ulazaka sintetičkih objekata, dok isprekidana linija predstavlja linearni rast očekivan pri konstantnoj stopi ulazaka.

2.4 Uvođenje empirijske kinematike

Pored uvođenja stacionarnosti, drugo značajno unapređenje generatora se tiče načina zadavanja kinematičkog modela koji određuje raspodelu brzina, pravce dolaska i orbitalne karakteristike generisanih međuzvezdanih objekata. Originalna verzija generatora je u ovu svrhu koristila Švarcšildov elipsoid brzina sa podesivim parametrima. Iako je tako bilo moguće zadati različite kinematičke modele (npr. korišćenjem parametara za specifičnu klasu zvezda), oblik raspodele je i dalje bio unapred zadat i zasnovan na pretpostavci približno Gausovih raspodela pojedinačnih komponenti brzina.

Lokalna raspodela brzina zvezda nije glatka Gausova raspodela, već sadrži izražene asimetrije, pokretne grupe i druge strukture koje su jasno vidljive u podacima misije Gaia [14]. Zbog toga je za potrebe ovog rada uvedena mogućnost da se generatoru prosledi proizvoljna numerički zadata raspodela brzina koja bi zamenila Švarcšildovu raspodelu, i na osnovu koje bi potom bili izračunati parametri za međuzvezdane objekte. Ovo je donelo opciju da se kinematika sintetičkih međuzvezdanih objekata izvede neposredno iz izmerenih brzina zvezda u Sunčevom okruženju, uz pretpostavku da, nakon izbacivanja iz svojih matičnih sistema, međuzvezdani objekti u velikoj meri zadržavaju njihovu galaktičku kinematiku, uz moguću dodatnu disperziju izazvanu samim procesom izbacivanja [9, 14].

Za implementaciju ovog pristupa korišćene su bliske zvezde iz kataloga Gaia DR3. Preuzeti su podaci o položajima, paralaksama, sopstvenim kretanjima i radijalnim brzinama zvezda, a u uzorak su uključene samo zvezde sa dostupnom radijalnom brzinom, relativnom greškom paralakse manjom od 10%, vrednošću $RUWE < 1.4$, više od osam perioda vidljivosti i više od sto astrometrijskih posmatranja duž pravca skeniranja. Na osnovu ovih podataka izračunate su heliocentrične galaktičke komponente brzine U , V i W , koje su korišćene kao aproksimacija trenutno nepoznate stvarne raspodele brzina ISO.

Kako katalog Gaia sadrži konačan broj zvezda i njihovih izmerenih vektora brzina, direktno uzorkovanje velikog broja vrednosti iz tog skupa bi dovelo do ponavljanja brzina pojedinačnih zvezda. Umesto toga, u cilju dobijanja glatke raspodele koja prati njihovu zajedničku raspodelu, korišćena je metoda procene gustine raspodele pomoću jezgra (*kernel density estimation*, KDE), pri čemu je širina jezgra određena Scottovim pravilom. KDE na osnovu diskretnog skupa izmerenih brzina u prostoru komponenti (U, V, W) konstruiše kontinualnu raspodelu verovatnoće. Oblasti pro-

GLAVA 2. GENERISANJE SINTETIČKE POPULACIJE MEĐUZVEZDANIH OBJEKATA

stora brzina u kojima se nalazi veći broj zvezda dobijaju veću verovatnoću, ali se pritom ne pretpostavlja da celokupna raspodela mora imati određen Gausijanski oblik, kao što je to slučaj sa Švarcšildovom raspodelom. Ovako dobijena raspodela može da očuva asimetrije, lokalne strukture i međusobne zavisnosti komponenata brzine koje bi jedna glatka Gausova raspodela zanemarila [14].

Iz dobijene raspodele generator uzorkuje nove vektore brzina, na osnovu kojih zatim određuje njihove intenzitete i pravce dolaska u Sunčev sistem. Za svaku od tri galaktičke populacije je formirana posebna KDE raspodela, i one su unapred izračunate i sačuvane, kako njihovo izračunavanje ne bi moralo da se ponavlja pri svakom pokretanju generatora. Ovo je omogućilo da se na računski veoma jeftin način u generator inkorporiraju empirijske raspodele brzina, i da se omoguće empirijski zasnovane raspodele radijanata ovih objekata, ali i ispitivanje specifičnosti međuzvezdanih objekata koji dolaze iz sistema koji pripadaju različitim galaktičkim populacijama.

2.5 Galaktičke populacije i mešoviti kinematički modeli

Zvezde koje pripadaju tankom disku, debelom disku i galaktičkom halou imaju međusobno različite raspodele brzina, zbog čega očekujemo da i objekti izbačeni iz sistema oko ovih zvezda verovatno imaju različite kinematičke odlike [9, 14]. Jedan od ciljeva ovog rada je da te razlike opiše i kvantifikuje, sa posebnim osvrtom na razlike u brzinama, pravcima dolaska, i verovatnoći detekcije objekata iz različitih galaktičkih populacija.

Da bi ovo bilo moguće, zvezde iz kataloga su klasifikovane u jednu od tri galaktičke populacije primenom metode koja je opisana u radu Bensby, Feltzing i Lundström [1]. Za svaku od tri populacije pretpostavlja se karakteristična raspodela komponenata brzine

$$f_i(U, V, W) = k_i \exp \left[-\frac{U^2}{2\sigma_{U,i}^2} - \frac{(V - V_{\text{asym},i})^2}{2\sigma_{V,i}^2} - \frac{W^2}{2\sigma_{W,i}^2} \right], \quad (2.5.1)$$

gde indeks i označava tanki disk, debeli disk ili halo, σ_U , σ_V i σ_W njihove karakteristične disperzije, a V_{asym} asimetrično zaostajanje u odnosu na LSR.

Pošto različite komponente nisu podjednako zastupljene u Sunčevom okruženju, vrednost f_i množi se njihovim lokalnim udelom X_i , koji su takođe preuzeti iz istog

GLAVA 2. GENERISANJE SINTETIČKE POPULACIJE MEĐUZVEZDANIH OBJEKATA

rada. Na osnovu odnosa tako dobijenih relativnih verovatnoća izdvojene su zvezde koje veoma verovatno pripadaju jednoj od populacija. Zvezde tankog diska zadovoljavale su uslov $TD/D \leq 0.1$, dok su zvezde debelog diska zadovoljavale $TD/D \geq 10$ i $TD/H \geq 1$. U uzorak haloa uključene su zvezde za koje je verovatnoća pripadnosti haloa bila veća od verovatnoća pripadnosti tankom ili debelom disku. Za tanki disk korišćene su zvezde iz kataloga Gaia na udaljenostima do 100 pc, dok je za lokalno manje zastupljene populacije debelog diska i haloa korišćen uzorak do 200 pc kako bi se osigurao dovoljan broj zvezda u svakom uzorku. Važno je napomenuti da analitičke raspodele iz Bensby, Feltzing i Lundström [1] nisu korišćene direktno za modelovanje brzina ISO, već su služile samo za klasifikaciju zvezda, za koju su heliocentrične brzine prethodno korigovane na LSR, dok su za modelovanje korišćene empirijske heliocentrične brzine iz kataloga Gaia. Konačni broj zvezda korišćenih za konstrukciju KDE raspodela za svaku galaktičku komponentu prikazan je u tabeli 2.1.

Tabela 2.1: Broj zvezda iz kataloga Gaia DR3 korišćenih za konstrukciju KDE raspodela brzina za pojedinačne galaktičke komponente.

Populacija	Maksimalna udaljenost	Broj zvezda
Tanki disk	100 pc	110 821
Debeli disk	200 pc	19 943
Halo	200 pc	2 308

Takođe treba napomenuti da dosadašnje procene ukazuju na to da je tanki disk najverovatniji izvor međuzvezdanih objekata koji prolaze kroz Sunčev sistem, ali da postoje šanse da nezanemarljiv broj naučno interesantnih objekata dolazi i iz ostale dve populacije. Recimo, Eubanks i dr. [9] procenjuju da približno 92% ISO dolazi iz tankog diska, oko 6% iz debelog diska, dok bi objekti poreklom iz galaktičkog haloa bili znatno ređi, na nivou jednog objekta po deceniji. Ipak, ovi procenti predstavljaju rezultat konkretnog modela, a ne empirijski izmerenu raspodelu porekla međuzvezdanih objekata. Zbog toga navedeni odnosi u ovom radu nisu usvojeni kao fiksni udeli, već je ispitan širi prostor mogućih kombinacija.

Pošto relativni doprinos tankog diska, debelog diska i haloa stvarnoj populaciji ISO nije poznat, u radu nije usvojena samo jedna pretpostavljena kombinacija. Umesto toga, razmatrane su sve kombinacije udela

$$f_D + f_{TD} + f_H = 1, \quad f_i \in \{0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}. \quad (2.5.2)$$

GLAVA 2. GENERISANJE SINTETIČKE POPULACIJE MEĐUZVEZDANIH OBJEKATA

Na ovaj način dobijena je mreža od 21 različitog kinematičkog modela, uključujući čiste populacije tankog diska, debelog diska i haloa, kao i njihove međusobne kombinacije sa korakom od 20%. Za svaku kombinaciju ukupna brojna gustina podeljena je proporcionalno između tri populacije u skladu sa zadatim udelima, nakon čega su odgovarajuće populacije generisane zasebno, a zatim spojene u konačnu zajedničku sintetičku populaciju. Za svaku kombinaciju nagiba SFD-a i modela albeda za neaktivne objekte, odnosno modela kometarne aktivnosti za aktivne objekte, generisana je 21 kinematička kombinacija tih objekata, kako bi zasebno mogli biti ispitani uticaji i ostalih parametara i kinematičkog sastava ISO populacije. Ovakav pristup ne predstavlja pretpostavku da su sve kombinacije podjednako verovatne, već služi za sistematsko ispitivanje osetljivosti rezultata LSST simulacije na trenutno nepoznatu kinematičku strukturu ISO populacije, te omogućava da se uticaj pretpostavljenih kinematičkih karakteristika na detektabilnost ISO ispita bez unapred usvojene pretpostavke o stvarnim udelima pojedinačnih populacija.

2.6 Praktične posledice unapređenja generatora

Uvođenjem stacionarne populacije izbegnuto je generisanje i propagiranje velikog broja objekata koji tokom simulacije nikada ne bi ušli u posmatranu zapreminu. Time su smanjeni računarski i memorijski zahtevi generatora, što je bilo naročito važno pri radu sa velikim brojem populacija i različitim vrednostima njihovih ulaznih parametara.

Zahvaljujući tome, simulacije u ovom radu nisu ograničene na jednu populaciju sa unapred pretpostavljenim karakteristikama. Umesto toga, sprovedeno je sistematsko pretraživanje prostora parametara (*parameter sweep*), u okviru kog je generisan veliki broj sintetičkih populacija sa različitim fizičkim i kinematičkim karakteristikama.

Na ovaj način, analiza nije ograničena na očekivani broj LSST detekcija za jednu pretpostavljenu populaciju, već će detaljno ispitati prirodu i broj detekcija za šest različitih nagiba funkcije raspodele objekata po veličinama, i to u kombinaciji sa četiri modela albeda za neaktivne objekte, odnosno četiri modela kometarne aktivnosti za aktivne objekte. Svaka od ovih kombinacija generisana je za 21 različitu kombinaciju kinematičkih osobina tri galaktičke populacije zvezda.

Ovakva mreža simulacija omogućava da se ispita kako i koliko očekivani broj i osobine LSST detekcija zavise od pojedinačnih pretpostavki o intrinzičnim ka-

GLAVA 2. GENERISANJE SINTETIČKE POPULACIJE MEĐUZVEZDANIH OBJEKATA

rakteristikama populacije međuzvezdanih objekata. Time se, umesto procene broja detekcija za jednu, najverovatniju populaciju, dobija pregled zavisnosti rezultata od raspodele veličina, fotometrijskih osobina i kinematičkog sastava populacije. Detaljne vrednosti svih korišćenih parametara i način formiranja pojedinačnih simulacija opisani su u narednoj glavi.

Glava 3

Simulacija LSST posmatranja pomoću simulatora Sorch

U prethodnoj glavi opisan je proces generisanja sintetičkih populacija međuzvezdanih objekata sa različitim fizičkim i kinematičkim karakteristikama, a u ovoj glavi će fokus biti na modelovanju njihovih fotometrijskih karakteristika i njihove kometarne aktivnosti, kao i na simuliranju njihove detektabilnosti u okviru pregleda neba Opservatorije Vera Rubin pomoću simulatora Sorch.

Pored orbitalnih elemenata i prečnika generisanih objekata, za ovakvu simulaciju je potrebno odrediti i njihov sjaj, zbog čega su aktivni i neaktivni objekti razmatrani odvojeno. Kod neaktivnih objekata ispitan je uticaj različitih vrednosti albeda, dok je kod aktivnih objekata korišćeno više modela kometarne aktivnosti. Kometarna aktivnost je u ranijim istraživanjima ovog tipa rede razmatrana i uglavnom pojednostavljeno modelovana, pa njen uticaj na očekivani broj LSST detekcija još nije dovoljno ispitan [4, 7, 8, 19].

U nastavku su opisani simulator Sorch, ulazni podaci i tok simulacije, korišćeni fotometrijski modeli, konfiguracija prve godine LSST pregleda, uslovi potrebni da bi objekat bio proglašen otkrivenim, kao i postupak automatizovanog izvršavanja simulacija i obrade njihovih izlaznih podataka.

3.1 Sorch simulator pregleda neba

Da bi se procenilo koje bi objekte LSST mogao da detektuje, nije dovoljno poznavati samo njihove orbite i magnitudu. Detektabilnost zavisi od mnogo varijabli, i potrebno je proveriti i da li se objekat u trenutku posmatranja nalazi u vidnom

polju teleskopa, da li je dovoljno sjajan u datim uslovima posmatranja i da li skup dobijenih detekcija ispunjava uslove potrebne za uspešno povezivanje i otkrivanje objekta. Istovremeno proveravanje svih ovih uslova za veliki broj objekata zahteva korišćenje simulatora pregleda neba. U ovom radu je u tu svrhu korišćen softverski paket SORCHA [20], verzija 0.9.2.

SORCHA je simulator razvijen prvenstveno za simuliranje posmatranja malih tela Sunčevog sistema u okviru pregleda neba Opservatorije Vera Rubin. Na osnovu orbita i fizičkih karakteristika ulaznih objekata, kao i zadate baze posmatranja, SORCHA efikasno računa njihove položaje i prividni sjaj u trenucima pojedinačnih ekspozicija teleskopa i primenjuje zadate posmatračke i instrumentalne efekte. Iako je razvijen za LSST, SORCHA je modularan alat i može se prilagoditi i drugim pregledima neba [20].

Za simuliranje LSST pregleda SORCHA koristi bazu sintetičkih posmatranja. Za svaku posetu polju u bazi navedeni su vreme posmatranja, položaj polja na nebu, korišćeni filter, granična magnituda, seeing i drugi podaci potrebni za procenu detektabilnosti objekata. Ove baze nastaju simuliranjem rada opservatorije pomoću paketa `rubin_sim` i `rubin_scheduler`, pri čemu se uzimaju u obzir pretpostavljeni vremenski uslovi, performanse teleskopa i kamere i karakteristike pojedinačnih filtera [20, 21].

Rad paketa SORCHA može se podeliti u dve glavne faze. U prvoj fazi računaju se efemeride objekata i određuje se u kojim simuliranim posmatranjima se objekat nalazi u posmatranom polju. U drugoj fazi računa se njegov očekivani sjaj i primenjuju se odabrani posmatrački i instrumentalni efekti [20].

3.2 Ulazni podaci i tok simulacije

Orbitalni elementi i prečnici međuzvezdanih objekata dobijeni su pomoću generatora opisanog u prethodnoj glavi. Prečnici pojedinačnih objekata su generisani u skladu sa zadatim nagibom funkcije raspodele objekata po veličinama, dok su orbite određene iz zadatog kinematičkog modela. Na osnovu prečnika i albeda su izračunate apsolutne magnitude, a objektima su kasnije dodeljene i boje i parametri fazne funkcije. U slučaju aktivnih objekata, dodeljeni su i parametri koji određuju kometarnu aktivnost u skladu sa izabranim modelom.

Za svaku populaciju pripremljeni su fajl sa orbitalnim elementima i fajl sa fizičkim parametrima objekata. Za aktivne populacije korišćen je i dodatni fajl sa

GLAVA 3. SIMULACIJA LSST POSMATRANJA POMOĆU SIMULATORA SORCHA

parametrima potrebnim za modelovanje kometarne aktivnosti. Fajlovi sa orbitalnim elementima su za svaki objekat navodili perihelno rastojanje, ekscentricitet, inklinaciju, longitudu uzlaznog čvora, argument perihela, vreme prolaska kroz perihel i referentnu epohu. U fajlu sa fizičkim parametrima zadate su apsolutna magnituda jezgra u r filteru, boje objekata u ostalim LSST filterima, kao i parametri fazne funkcije. Ove informacije su kroz različite fajlove povezivane pomoću jedinstvenog identifikatora, koji je svaki od objekata posedovao. Način određivanja ovih vrednosti je detaljnije opisan u sekciji 3.3.

Za svaku kombinaciju nagiba funkcije raspodele po veličinama, fotometrijskog modela i kinematičkih karakteristika je formirana zasebna ulazna populacija. Aktivni i neaktivni objekti su simulirani odvojeno, kao zasebne populacije, pri čemu odnos aktivnih i neaktivnih objekata u ISO populaciji nije posebno modelovan. Ulazni fajlovi su zatim, zajedno sa bazom simuliranih LSST posmatranja za prvu godinu pregleda i odgovarajućim konfiguracionim fajlom, prosleđeni simulatoru SORCHA.

Efemeride su računate unutar simulatora SORCHA, pomoću njegovog integrisanog generatora zasnovanog na paketima ASSIST i REBOUND. Najpre su pronađena moguća posmatranja svakog objekta, odnosno posete čijem se vidnom polju objekat nalazio dovoljno blizu [20].

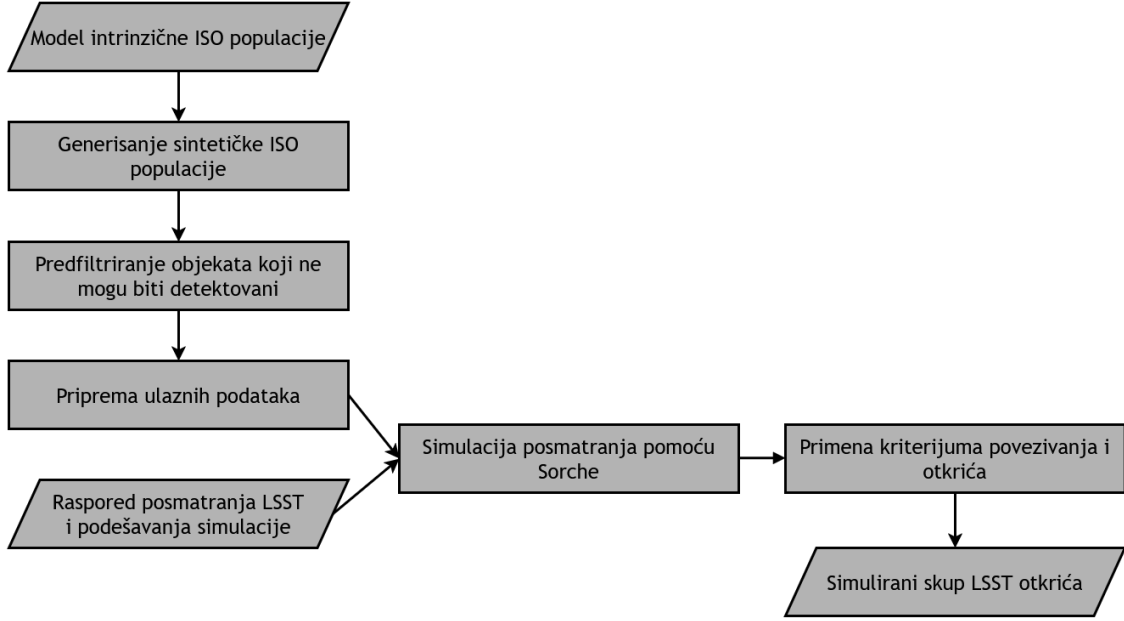
Moguća posmatranja su zatim prošla kroz fazu naknadne obrade (*post-processing*), tokom koje su računate prividne magnitude objekata i primenjeni izabrani posmatrački efekti. Na kraju, proverena je i ispunjenost kriterijuma otkrića za svaki od objekata [20]. Podešavanja za ove korake su detaljnije opisana u sekciji 3.4, dok je struktura izlaznih podataka objašnjena u sekciji 3.6.

Celokupan algoritamski tok, od zadavanja modela intrinzične ISO populacije do dobijanja simuliranog skupa LSST otkrića, prikazan je na slici 3.1.

Isti postupak može se kompaktno predstaviti i matematički. Neka θ označava parametre pretpostavljenog modela populacije, kao što su nagib SFD-a, brojna gustina, fotometrijski model i kinematički sastav, dok $\mathbf{x}$ predstavlja fizičke i dinamičke osobine pojedinačnog objekta koje su relevantne za njegovo otkrivanje, kao što su prečnik ili hiperbolička ekscesna brzina objekta. Ako je $p_{\text{int}}(\mathbf{x} \mid \theta)$ raspodela ovih osobina u intrinzičnoj populaciji, a $P_{\text{otk}}(\mathbf{x} \mid \mathcal{S})$ verovatnoća da objekat sa tim osobinama bude otkriven u okviru pregleda $\mathcal{S}$, raspodela osobina među simuliranim LSST otkrićima može se konceptualno zapisati kao

$$p_{\text{LSST}}(\mathbf{x} \mid \theta, \mathcal{S}) \propto p_{\text{int}}(\mathbf{x} \mid \theta) P_{\text{otk}}(\mathbf{x} \mid \mathcal{S}). \quad (3.2.1)$$

GLAVA 3. SIMULACIJA LSST POSMATRANJA POMOĆU SIMULATORA SORCHA



Slika 3.1: Algoritamski tok simulacionog postupka korišćenog u ovom radu, od pretpostavljenog modela ISO populacije do simuliranog skupa LSST otkrića.

Selekciona funkcija P_{otk} obuhvata zavisnost detektabilnosti od osobina objekta i karakteristika samog pregleda. Za fiksnu generisanu sintetičku populaciju, očekivani broj otkrića se može konceptualno predstaviti kao

$$\lambda(\boldsymbol{\theta}, \mathcal{S}) = \sum_{i=1}^{N_{\text{gen}}} P_{\text{otk}}(\mathbf{x}_i | \mathcal{S}), \quad (3.2.2)$$

gde je N_{gen} broj objekata u generisanoj sintetičkoj populaciji.

Ovi izrazi pokazuju da broj i osobine otkrivenih objekata ne zavise samo od intrinzične populacije, već i od selekcije koju uvodi sam pregled. Simulirani skup otkrića zato u opštem slučaju nije reprezentativan uzorak intrinzične populacije, već njen podskup uslovljen selekcionim efektima.

U simulacijama je ovo preslikavanje realizovano numerički. Generator daje sintetičku populaciju u skladu sa pretpostavljenim modelom intrinzične populacije, nakon čega SORCHA simulira njena LSST posmatranja i primenjuje odgovarajuće posmatračke efekte i kriterijume otkrića.

3.3 Modelovanje populacije međuzvezdanih objekata

Da bi SORCHA mogla da izračuna prividne magnitude sintetičkih međuzvezdanih objekata u pojedinačnim ekspozicijama, potrebno je zadati njihove fizičke i fotometrijske karakteristike. Usled malog broja i međusobne raznovrsnosti dosadašnjih otkrića međuzvezdanih objekata, ne postoji dovoljno informacija da bi se pouzdano usvojio samo jedan model ovih karakteristika. Zbog toga su neke od ovih vrednosti u ovom radu sistematski varirane, sa ciljem ispitivanja diskretne mreže različitih modela. Konkretno, ova sekcija se bavi izborom modela albeda, boje, fazne funkcije i kometarne aktivnosti sintetičkih objekata.

Za svaki generisani objekat poznat je njegov prečnik D koji se dobija iz generatora sintetičke populacije. Iz njega za sve objekte izračunavamo apsolutnu magnitudu, koristeći standardnu vezu između prečnika, geometrijskog albeda p i apsolutne magnitude [12],

$$D_{\text{km}} = \frac{1329}{\sqrt{p}} 10^{-H/5}, \quad (3.3.1)$$

odnosno

$$H = 5 \log_{10} \left(\frac{1329}{D_{\text{km}} \sqrt{p}} \right), \quad (3.3.2)$$

gde je D_{km} prečnik objekta izražen u kilometrima. Kod neaktivnih objekata je albedo variran kao slobodni parametar, sa vrednostima $p \leq 0.2$. Kod aktivnih objekata je korišćena konstantna vrednost $p = 0.04$. Ovako izračunata vrednost prosleđena je simulatoru SORCHA kao apsolutna magnituda objekta u r filteru, H_r . Kod aktivnih objekata ovo predstavlja magnitudu golog jezgra objekta, a doprinos kome je izračunavan naknadno.

Pošto je H_r korišćena kao referentna apsolutna magnituda, za računanje sjaja u ostalim LSST filterima SORCHI su prosleđene boje objekata u odnosu na r filter. Za sve aktivne i neaktivne objekte usvojene su iste vrednosti

$$\begin{aligned} u - r &= 2.31, & g - r &= 0.73, \\ i - r &= -0.33, & z - r &= -0.50, & y - r &= -0.68. \end{aligned} \quad (3.3.3)$$

Navedeni indeksi boje odgovaraju refleksionom spektru sa spektralnim nagibom $S' = 15\%/1000 \text{ \AA}$. Ovu vrednost kao reprezentativnu za 1I/'Oumuamua usvajaju

Jewitt i Seligman [16], na osnovu raspona objavljenih merenja njegovog optičkog spektralnog nagiba.

Apsolutna magnituda u proizvoljnom filteru X tako se dobija kao

$$H_X = H_r + (X - r). \quad (3.3.4)$$

Promena sjaja sa faznim uglom modelovana je pomoću HG fazne funkcije [2] implementirane u simulatoru SORCHA. Za sve objekte korišćena je vrednost parametra $G = 0.15$, koja predstavlja uobičajenu pretpostavku za mala tela bez poznate fazne krive i koja je preuzeta iz Cook i dr. [4]. Ovaj parametar je konstantan za sve populacije, tako da uticaj njegovog izbora nije zasebno ispitivan u ovom radu.

Neaktivni objekti i modeli albeda

Kada je u pitanju modelovanje sjaja neaktivnih objekata, u ovom radu je fokus stavljen na variranje vrednosti geometrijskog albeda. Vrednosti od $p = 0.04$ – 0.06 često su korišćene u prethodnim simulacijama međuzvezdanih objekata [4, 8], dok je vrednost $p = 0.10$ korišćena kao jedna od pretpostavki u radu Marčeta i Seligman [19]. U tom radu pokazano je i da očekivani broj LSST detekcija snažno zavisi od pretpostavljenog albeda populacije.

U ranijim istraživanjima razmatrane su i više vrednosti albeda. Ezell i Loeb [10] su, pored modela sa konstantnim albedom $p = 0.06$, razmatrali i model u kom su empirijske raspodele albeda NEO asteroida korišćene kao izvor vrednosti albeda za ispitivanje detektabilnosti ISO. Ova raspodela je bimodalna, sa maksimumima na približno $p = 0.03$ i $p = 0.168$ [10].

Na osnovu ovih vrednosti, u ovom radu su razmatrana četiri modela albeda. U prva tri modela je svim objektima unutar jedne populacije dodeljena ista vrednost albeda,

$$p = 0.05, \quad 0.10, \quad 0.20. \quad (3.3.5)$$

Četvrti model je zasnovan na empirijskoj raspodeli albeda Jupiterovih trojanaca dobijenoj iz posmatranja WISE/NEOWISE [11]. Jupiterovi trojanci izabrani su kao primer velike i dobro posmatrane populacije pretežno tamnih, primitivnih malih tela. Na taj način je, pored tri kontrolisana modela sa konstantnim albedom, uveden i empirijski scenario u kom se reflektivnost razlikuje od objekta do objekta.

Vrednosti albeda u korišćenom uzorku se nalaze u opsegu od 0.025 do 0.20 , sa medijanom na 0.07 . Za formiranje empirijskog modela raspodela izmerenih albeda

podeljena je u 20 intervala, nakon čega je interpolirana prirodnim kubnim splajnom. Iz tako dobijene raspodele vrednosti su uzorkovane metodom inverzne transformacije. Za razliku od modela sa konstantnim albedom, u ovom slučaju svakom sintetičkom objektu nezavisno je dodeljena jedna uzorkovana vrednost.

Aktivni objekti i modeli kometarne aktivnosti

Modelovanje sjaja aktivnih međuzvezdanih objekata je značajno složenije nego kod neaktivnih objekata. Za razliku od neaktivnih objekata, čiji se sjaj može proceniti na osnovu njegove veličine, albeda i geometrije posmatranja, ukupan sjaj aktivnih objekata često može biti dominantno određen doprinosom njihove kome, i stoga zavisi od karakteristika kao što su sastav njihovog jezgra, količina i osobine izbačene prašine, udeo aktivne površine i termička istorija objekta. Ove zavisnosti nisu jednostavne ni kod kometa Sunčevog sistema, dok je kod međuzvezdanih objekata ovaj problem dodatno izražen jer još uvek nemamo reprezentativan uzorak ISO na osnovu kog bismo mogli da pretpostavimo raspodele ovih vrednosti na nivou čitave populacije [4, 16].

Zbog toga, cilj ovog rada nije da predloži jedinstven model kometarne aktivnosti međuzvezdanih objekata, već da, kroz korišćenje nekoliko međusobno različitih empirijskih modela sjaja, ispita uticaj pretpostavljenog nivoa aktivnosti na detektabilnost ISO. U ovom radu razmatrana su četiri modela preuzeta iz Cook i dr. [4]. Svi modeli koriste istu funkciju zavisnosti sjaja od prečnika, ali različite vrednosti njenih parametara, preuzete iz ranijih radova.

Za svaki aktivni objekat je prvo izračunata apsolutna magnituda jezgra primeenom prethodno navedene formule 3.3.2 sa usvojenim kometarnim albedom $p = 0.04$. Zatim je izračunata ukupna kometna apsolutna magnituda H_c korišćenjem empirijske relacije iz Cook i dr. [4]

$$H_c = \frac{\log_{10} D_{\text{km}} - b_2}{b_1}, \quad (3.3.6)$$

gde je D_{km} prečnik jezgra izražen u kilometrima, dok su b_1 i b_2 empirijski koeficijenti koji određuju nagib i nulu veze između veličine jezgra i kometarne apsolutne magnitude. Unutar svake od četiri simulirane populacije svi objekti imali su iste vrednosti b_1 , b_2 i n . Njihove kometarne apsolutne magnitude ipak su se razlikovale zbog različitih prečnika jezgara. Shodno tome, ova četiri modela predstavljaju četiri homogene populacije sa različitim pretpostavljenim nivoima kometarnog sjaja.

GLAVA 3. SIMULACIJA LSST POSMATRANJA POMOĆU SIMULATORA SORCHA

Tabela 3.1: Parametri veze između prečnika jezgra i kometarne apsolutne magnitude za četiri modela preuzeta iz Cook i dr. [4].

Model	b_1	b_2
Kresák (1978)	−0.20	2.10
Bailey i Stagg (1988)	−0.17	1.90
Weissman (1996)	−0.13	1.86
Sosa i Fernández (2011)	−0.13	1.20

Takođe, za svaki od ova četiri modela je u ovom radu usvojena vrednost fotometrijskog indeksa aktivnosti $n = 4$, i ona je konstantna i pre i posle perihela. Ova vrednost odgovara uobičajenoj konvenciji kometarne apsolutne magnitude H_{10} i razmatrana je i u jednom od scenarija rada Cook i dr. [4]. Korišćenjem jedinstvene vrednosti n ograničen je broj slobodnih parametara i izbegnuto je uvođenje dodatnih pretpostavki. Ovakav pristup predstavlja pojednostavljenje, jer se brzina promene kometarnog sjaja razlikuje između objekata i može biti asimetrična u odnosu na perihel.

Ukupna prividna magnituda komete računata je prema izrazu

$$m_c = H_c + 5 \log_{10} \Delta + 2.5n \log_{10} r_h - 2.5 \log_{10} \gamma(\alpha), \quad (3.3.7)$$

gde su r_h heliocentrično, a Δ geocentrično rastojanje izraženi u astronomskim jedinicama, n fotometrijski indeks aktivnosti, dok je $\gamma(\alpha)$ fazna funkcija opisana u prethodnoj podsekciji [4]. Ista formula korišćena je i za računanje prividne magnitude golog jezgra, pri čemu je korišćeno $n = 2$.

Za svako potencijalno posmatranje zasebno su računate prividna magnituda golog jezgra i ukupna prividna magnituda komete, nakon čega je kao konačna uzeta svetlija od dve vrednosti,

$$m = \min(m_{\text{jezgro}}, m_c). \quad (3.3.8)$$

Ova deo-po-deo definicija preuzeta je iz Cook i dr. [4]. Njome se sprečava da ekstrapolacija empirijskog kometarnog zakona na velika heliocentrična rastojanja učini aktivni objekat tamnijim od njegovog golog jezgra.

3.4 Model LSST pregleda i kriterijumi detekcije

Da bi neki sintetički međuzvezdani objekat u simuliranom LSST pregledu bio smatran otkrivenim, potrebno je da prođe kroz nekoliko uzastopnih nivoa selekcije.

GLAVA 3. SIMULACIJA LSST POSMATRANJA POMOĆU SIMULATORA SORCHA

Prvo se određuje da li se u trenutku neke posete objekat nalazi unutar posmatranog polja. Zatim se procenjuje da li bi pri uslovima te posete bio uspešno detektovan, uzimajući u obzir njegov sjaj, graničnu magnitudu posete, model pokrivenosti vidnog polja i efekat razmazivanja signala. Konačno, skup ovakvih pojedinačnih detekcija mora zadovoljiti zadate kriterijume povezivanja kako bi objekat mogao da bude klasifikovan kao otkriven.

U narednim podsekcijama opisana je konfiguracija Sorch simulatora korišćena za modelovanje prve godine LSST pregleda za potrebe ovog rada. Biće reči o rasporedu poseta, modelu vidnog polja, posmatračkim i instrumentalnim efektima koji utiču na detektabilnost, i o kriterijumima za uspešno povezivanje detekcija.

Tabela 3.2: Osnovna podešavanja LSST i Sorch simulacije.

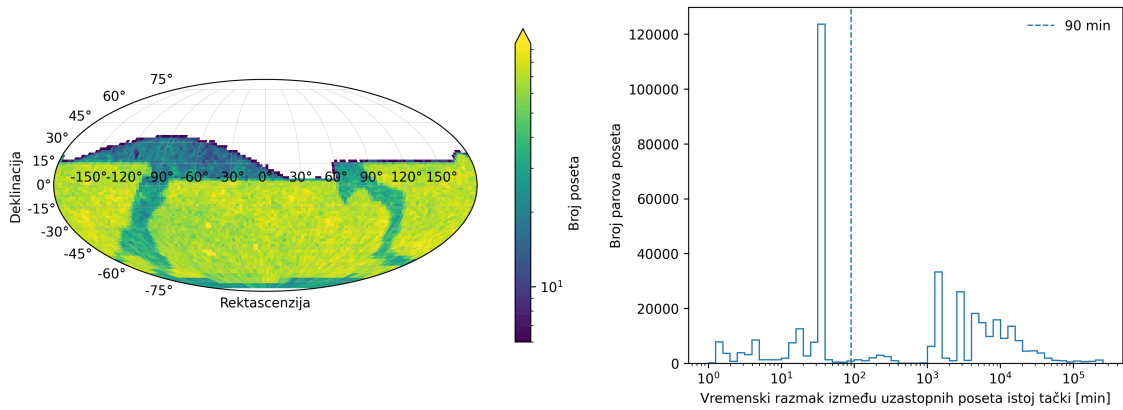
Podešavanje	Korišćena vrednost
Verzija simulatora Sorch	0.9.2
Baza posmatranja	baseline_v4.3.5_1_year.db
Broj poseta	184 136
Trajanje simulacije	363.27 dana
Poluprečnik vidnog polja	1.75°
Faktor popunjenosti kamere	0.9
Granica zasićenja	$m = 16$
Širina fading filtera	$w = 0.1$
Detekcije po trackletu	najmanje 2
Najveći razmak unutar trackleta	90 min
Najmanji prividni pomeraj	0.5"
Kriterijum otkrića	3 trackleta tokom 3 noći u 15 dana
Nominalna efikasnost povezivanja	0.95

Raspodela posmatranja

Raspored posmatranja LSST pregleda zadat je pomoću baze planiranih posmatranja `baseline_v4.3.5_1_year.db`, koja predstavlja jednu preoperativnu realizaciju strategije posmatranja tokom prve godine pregleda. Baza sadrži 184 136 različitih poseta u intervalu od MJD 60980.002 do MJD 61343.273, odnosno približno 363.27 dana, od 1. novembra 2025. do 30. oktobra 2026. U bazi su za svaku posetu polju navedeni vreme posmatranja, položaj centra vidnog polja, korišćeni filter, ukupno vreme ekspozicije, broj pojedinačnih ekspozicija, uslovi seeinga i očekivana granična magnituda.

GLAVA 3. SIMULACIJA LSST POSMATRANJA POMOĆU SIMULATORA SORCHA

Prostorna raspodela poseta i raspodela vremenskih razmaka između uzastopnih poseta istim oblastima neba prikazane su na slici 3.2. Raspodela poseta na nebu pokazuje karakterističan otisak korišćene strategije posmatranja, dok raspodela vremenskih razmaka sadrži izražen maksimum na kratkim vremenskim skalama i širu raspodelu ponovnih poseta na skalama od više sati i dana. Isprekidana linija označava razmak od 90 min, koji je u korišćenoj konfiguraciji najveći dozvoljeni vremenski razmak između detekcija unutar jednog trackleta.



Slika 3.2: Prostorna i vremenska raspodela posmatranja u korišćenoj realizaciji prve godine pregleda. Levo je prikazan ukupan broj poseta u različitim oblastima neba, a desno raspodela vremenskih razmaka između uzastopnih poseta istoj oblasti neba. Isprekidana linija označava 90 min, najveći dozvoljeni razmak između detekcija unutar jednog trackleta u korišćenoj konfiguraciji.

Korišćena baza predstavlja stariju preoperativnu realizaciju strategije posmatranja, a od njenog objavljivanja dostupne su i novije verzije.

Model vidnog polja i pojedinačne detekcije

Vidno polje pojedinačne posete modelovano je kao krug poluprečnika 1.75°. Umesto pune geometrijske mape LSSTCam kamere, uključujući položaje pojedinačnih detektora i praznine između njih, korišćen je faktor popunjenosti $f = 0.9$. Na taj način je gubitak potencijalnih detekcija usled neaktivnih delova žižne ravni uključen statistički [20].

U simulaciji su korišćena posmatranja u svih šest LSST filtera, u , g , r , i , z i y . Izvori svetliji od magnitude $m = 16$ uklanjani su zbog zasićenja detektora. Na slabom kraju nije korišćen oštar presek na graničnoj magnitudi posete. Umesto toga, verovatnoća detekcije postepeno se smanjuje u njenoj okolini. U korišćenoj

konfiguraciji širina ovog prelaza iznosila je $w = 0.1$, dok je maksimalna detekcijska efikasnost bila jednaka jedinici [20].

Efekat razmazivanja signala

U svim simulacijama uključen je efekat razmazivanja signala (*trailing loss*). Tokom jedne ekspozicije, objekti sa velikom prividnom ugaonom brzinom prelaze merljivo rastojanje na detektoru, zbog čega se njihov fluks raspoređuje duž traga umesto da bude koncentrisan u tačkastom izvoru. Time se smanjuje odnos signala i šuma i verovatnoća pojedinačne detekcije [19].

Sorcha ovaj gubitak računa na osnovu ugaone brzine objekta, ukupnog vremena ekspozicije posete i uslova seeinga, a zatim njime koriguje magnitudu korišćenu pri određivanju verovatnoće detekcije [20]. Ovaj efekat je posebno značajan za male međuzvezdane objekte, koji mogu postati dovoljno sjajni za detekciju tek pri bliskim prolascima, kada su njihove prividne ugaone brzine često najveće.

Kriterijumi otkrića

Pojedinačna LSST detekcija nije automatski smatrana otkrićem objekta. Da bi objekat mogao da bude identifikovan, njegove detekcije najpre moraju biti povezane tokom iste noći, a zatim i između više različitih noći. Ovaj korak predstavlja važan deo selekcionarne funkcije pregleda, jer objekat može imati jednu ili više pojedinačnih detekcija, ali ipak ne zadovoljiti sve uslove potrebne za određivanje njegove orbite.

Sorcha ne izvršava kompletan LSST Solar System Processing proces povezivanja detekcija, koji bi uključivao pretragu mogućih povezivanja između velikog broja detekcija i određivanje orbita. Pošto je identitet svakog sintetičkog objekta unapred poznat, algoritam *miniDiff* proverava samo da li vremenski raspored i međusobni položaji njegovih detekcija zadovoljavaju zadate kriterijume otkrića [20].

U korišćenoj konfiguraciji, za formiranje jednog trackleta su potrebne najmanje dve detekcije tokom iste noći. Vremenski razmak između njih nije smeo biti duži od 90 minuta, dok je neophodan minimalni prividni pomerač objekta na nebu između detekcija iznosio $0.5''$. Objekat je klasifikovan kao otkriven ukoliko je formirao najmanje tri trackleta tokom tri različite noći, i to unutar vremenskog prozora od 15 dana.

Nakon primene navedenih uslova korišćena je nominalna efikasnost povezivanja od 0.95 [20]. Ona je primenjena kao stohastičko odbacivanje 5% objekata koji su

zadovoljili vremenske i prostorne kriterijume povezivanja. Ovakva aproksimacija verovatnoće uspeha povezivanja može biti optimistična za najbrži deo ISO populacije. Međuzvezdani objekti pri bliskim prolascima mogu imati ugaone brzine i ubrzanja veća od tipičnih vrednosti za većinu vezanih populacija malih tela, što otežava formiranje trackleta i njihovo povezivanje između noći [19].

U konačnim rezultatima kao otkrića su brojani jedinstveni objekti koji su zadovoljili navedene kriterijume. Za uspešno povezane objekte SORCHA zadržava sve njihove ranije i kasnije detekcije, pa su u izlaznim logovima odvojeno zabeleženi broj jedinstvenih otkrivenih objekata i ukupan broj njihovih pojedinačnih detekcija.

3.5 Automatizovano izvršavanje simulacija

Zbog velikog broja razmatranih kombinacija parametara, ručno generisanje populacija, pokretanje SORCHA simulatora i obrada izlaznih podataka ne bi bili praktični. Zbog toga je u okviru ovog rada razvijen automatizovani Python pipeline koji povezuje generisanje sintetičkih populacija, pripremu ulaznih fajlova, izvršavanje SORCHA simulacija i evidentiranje rezultata.

Lista zadatka formirana je na osnovu centralne konfiguracije. Svaki zadatak odgovara jednoj kombinaciji nagiba SFD-a, kinematičkog sastava populacije i jednog modela albeda, odnosno kometarne aktivnosti. Razmatrana je 21 kombinacija objekata sa kinematičkim karakteristikama tankog diska, debelog diska i haloa, šest nagiba SFD-a, četiri modela albeda za neaktivne i četiri modela kometarne aktivnosti za aktivne objekte. Time je formirano ukupno

$$21 \times 6 \times 4 + 21 \times 6 \times 4 = 1008 \quad (3.5.1)$$

različitih konfiguracija simulacije.

Pre pokretanja zadatka formirane su i sačuvane KDE raspodele brzina za tri galaktičke komponente. Zadaci su zatim izvršavani paralelno na serveru Superast, pri čemu je istovremeno korišćeno do 30 procesorskih jezgara. Svaki proces generisao je sintetičku populaciju za odgovarajuću konfiguraciju i na nju primenio prefilter kojim su uklanjani objekti koji ni pri najpovoljnijim razmatranim uslovima nisu mogli dostići prag detekcije. Nakon toga su napravljeni ulazni fajlovi i pokrenuta je zasebna SORCHA simulacija za tu populaciju.

GLAVA 3. SIMULACIJA LSST POSMATRANJA POMOĆU SIMULATORA SORCHA

Populacije su generisane zasebno za svaki interval prečnika, a za svaki od tih intervala objekti su generisani unutar sfere čiji poluprečnik odgovara maksimalnom rastojanju na kom bi najveći objekat bio detektabilan pri korišćenom fotometrijskom modelu. Zbog toga broj prvobitno generisanih objekata u populaciji predstavlja zbir objekata generisanih u više različitih intervala prečnika. Nakon generisanja je cela populacija prosleđena predfilteru, čiji je cilj bio povećanje računarske efikasnosti eliminacijom objekata koje LSST neće moći da posmatra. Za svaki objekat posebno je procenjeno maksimalno heliocentrično rastojanje sa kog bi ga LSST mogao potencijalno detektovati. Predfilter je uklanjao objekte čiji perihel se nije nalazio unutar tog rastojanja, a zatim i one objekte koji do tog rastojanja ne bi mogli da stignu tokom simuliranih godinu dana pregleda.

Za svaki zadatak korišćen je jedinstven identifikator, koji je ujedno služio za inicijalizaciju generatora slučajnih brojeva prilikom formiranja sintetičke populacije, čime je omogućena potpuna reproducibilnost generisanih populacija.

Izlazi svakog zadatka smešteni su u zaseban direktorijum, zajedno sa korišćenim ulaznim fajlovima i automatski formiranim sažetkom rezultata. Tokom izvršavanja najpre su korišćeni privremeni direktorijumi, koji su preimenovani u konačne tek nakon uspešnog završetka zadatka. Na taj način nepotpuni rezultati mogli su se jasno razlikovati od završenih simulacija, dok su neuspešni zadaci mogli zasebno da se ponove bez gubitka već sačuvanih rezultata.

Pipeline je odvojeno evidentirao zadatke za koje nakon prefiltriranja nije ostao nijedan objekat, kao i greške nastale tokom izvršavanja. Za svaki uspešno završen zadatak automatski je sačuvan sažetak osnovnih rezultata i vremena izvršavanja.

Ovakva organizacija nije služila samo ubrzavanju izvršavanja, već je omogućila da sve razmatrane konfiguracije budu obrađene istim nizom koraka i da za svaki rezultat ostane sačuvan trag o korišćenim parametrima, ulaznim podacima i toku simulacije. Time je smanjena mogućnost grešaka usled ručne obrade i olakšano naknadno poređenje rezultata između različitih modela.

Odvajanje baze posmatranja, fizičkih parametara populacije i konfiguracije simulatora omogućava relativno jednostavno ponavljanje istog postupka sa drugačijim parametrima populacije, i ostavlja mogućnost adaptacije pipelinea za druge preglede neba.

3.6 Izlazni podaci

Svaki red izlaznog SORCHA fajla predstavlja jednu sintetičku detekciju jednog objekta tokom određene posete polju. Izlaz, između ostalog, sadrži identifikator objekta, vreme posmatranja, njegov prividni položaj i korišćeni filter, kao i izračunate fotometrijske i geometrijske veličine. Za kasniju analizu korišćeni su pre svega prividna magnituda objekta, heliocentrično i geocentrično rastojanje, prividna ugona brzina i oznaka galaktičke komponente kojoj objekat pripada.

Pošto korišćena konfiguracija zadržava samo objekte koji su zadovoljili kriterijume povezivanja, svi redovi konačnog izlaza odnose se na otkrivene objekte. Grupisanjem redova prema jedinstvenom identifikatoru objekta određen je broj otkrivenih objekata, dok ukupan broj redova predstavlja broj njihovih pojedinačnih detekcija. Na taj način razlikuju se broj jedinstvenih LSST otkrića i ukupan broj simuliranih detekcija tih objekata.

Za svaku simuliranu konfiguraciju pipeline je automatski formirao i zbirni fajl sa osnovnim rezultatima. U njemu su beleženi broj prvobitno generisanih objekata, broj objekata koji su prošli prefiltriranje, broj jedinstvenih otkrivenih objekata, ukupan broj njihovih detekcija i raspodela otkrića prema kinematičkim komponentama populacije. Zajedno sa parametrima zadatka, ovi podaci omogućavaju poređenje rezultata između različitih nagiba SFD-a, modela albeda ili kometarne aktivnosti i kinematičkih mešavina.

Pojedinačni SORCHA izlazni fajlovi korišćeni su za detaljniju analizu osobina detektovanih objekata, dok su automatski formirani sažeci korišćeni za poređenje celokupne mreže simulacija. Dobijeni rezultati predstavljeni su u glavi 4.

Glava 4

Rezultati i diskusija

U ovoj glavi prikazani su rezultati simulacija prve godine LSST pregleda za različite pretpostavljene populacije međuzvezdanih objekata. Najpre je dat pregled raspona dobijenih brojeva otkrića kroz ceo ispitani prostor parametara, nakon čega su odvojeno razmotreni uticaji raspodele veličina, fotometrijskih osobina i kinematičkog sastava populacije. Zatim su ispitane selekcionarne pristrasnosti LSST pregleda neba i prokomentarisana ograničenja korišćenog modela.

Aktivne i neaktivne populacije korisno je razmatrati odvojeno zbog različitog načina na koji je njihov sjaj modelovan. Neaktivni objekti predstavljaju fotometrijski jednostavniji slučaj, pošto je njihov sjaj neposredno određen prečnikom i albedom, dok kod aktivnih objekata rezultat dodatno zavisi od slabo poznate veze između veličine jezgra i kometarnog sjaja, čiji značaj postaje posebno veliki kod najmanjih objekata. Poređenje ove dve grupe zato omogućava da se proceni dodatni uticaj modelovanja kometarne aktivnosti na broj i osobine otkrivenih objekata.

Kada je za određenu kombinaciju SFD-a i fotometrijskih pretpostavki radi sažetog poređenja navedena jedna vrednost broja otkrića, ako nije naznačeno drugačije, ona predstavlja neponderisanu aritmetičku sredinu rezultata svih simuliranih kinematičkih sastava. Svaki sastav u ovoj srednjoj vrednosti ima jednaku težinu i zato se ona koristi prvenstveno za poređenje različitih modela i ne predstavlja očekivani broj otkrića za stvarnu ISO populaciju, čiji kinematički sastav nije poznat.

4.1 Očekivani broj otkrića

Za potrebe ovog rada, kroz ukupno 1008 različitih simuliranih konfiguracija, generisano je 2.1×10^8 sintetičkih međuzvezdanih objekata. Nakon prefiltriranja

opisanog u glavi 3, 5.7×10^7 objekata prosleđeno je simulatoru SORCHA. Kriterijume otkrića ukupno je zadovoljilo 75 635 sintetičkih objekata, za koje je zabeleženo 1.27×10^6 pojedinačnih detekcija. Sve populacije generisane su za istu referentnu međuzvezdanu brojnu gustinu $n_0 = 0.1 \text{ au}^{-3}$ za objekte prečnika većeg od 100 m, pa se dobijeni brojevi otkrivenih objekata pri različitim pretpostavljenim osobinama populacija mogu međusobno porediti.

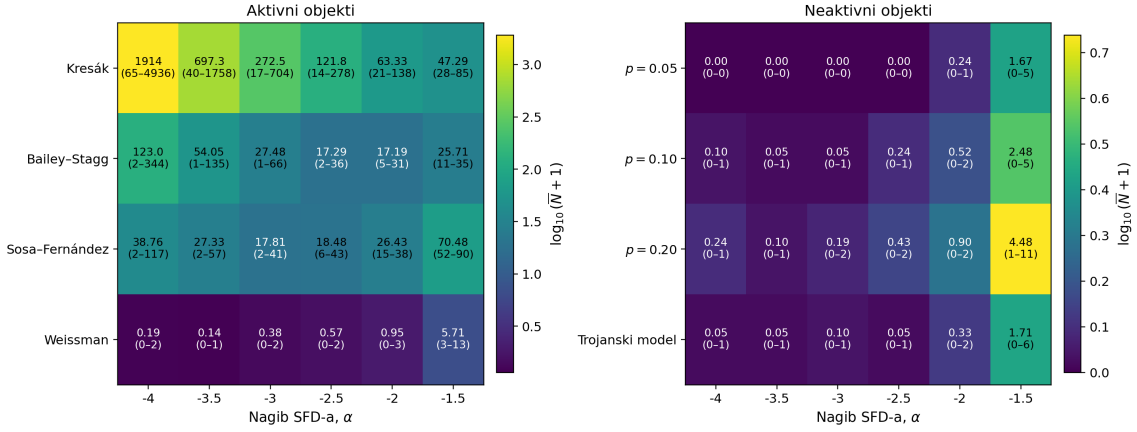
Tabela 4.1: Obim glavnog skupa simulacija međuzvezdanih objekata.

Populacija	Broj konfiguracija	Generisano	Posle prefiltriranja	Ukupno otkrića	Ukupno detekcija
Aktivni	504	149 848 403	34 170 438	75 342	1 255 701
Neaktivni	504	59 026 025	22 564 300	293	9 939
Ukupno	1008	$\simeq 2.1 \times 10^8$	$\simeq 5.7 \times 10^7$	$> 7.5 \times 10^4$	$\simeq 1.27 \times 10^6$

Osnovni rezultat svake simulirane konfiguracije predstavlja broj jedinstvenih međuzvezdanih objekata koji su tokom prve godine LSST pregleda zadovoljili usvojene kriterijume otkrića. Već i sam raspon brojeva otkrivenih objekata pri različitim konfiguracijama pokazuje da očekivani broj ISO koje bi LSST mogao da otkrije snažno zavisi od intrinzičnih osobina populacije. U rezultatima ovog rada broj otkrića neaktivnih objekata kreće se od 0 do 11, dok je za aktivne objekte dobijeno od 0 do 4936 otkrivenih objekata tokom prve godine pregleda. Nulte vrednosti su naročito česte kod neaktivnih populacija, kod kojih se takav ishod javlja u 365 od 504 ispitane konfiguracije. Kod aktivnih populacija bez otkrića je ostalo 69 od 504 konfiguracije, i to isključivo pri korišćenju fotometrijski nepovoljnog Weissman modela kometarne aktivnosti.

Slika 4.1 daje pregled dobijenih brojeva otkrivenih objekata kroz ceo ispitani prostor nagiba SFD-a i fotometrijskih modela. Za svaku kombinaciju prikazana je srednja vrednost kroz 21 kinematički sastav, zajedno sa rasponom pojedinačnih rezultata.

Slika 4.1 pokazuje da se dobijeni broj otkrića menja za nekoliko redova veličine kroz ispitani prostor parametara. Najveće razlike se javljaju kod aktivnih objekata, gde izbor modela kometarne aktivnosti snažno menja zavisnost rezultata od nagiba SFD-a. Kresákov model daje nagli rast broja otkrića ka strmijim SFD-ovima, i pri $\alpha = -4.0$ daje u proseku 1900 otkrića kroz 21 ispitani kinematički sastav, uz raspon od 65 do 4936. Bailey–Staggov i Sosa–Fernándezov model u ovom delu parametarskog prostora daju znatno manje vrednosti, dok Weissmanov model u većini konfiguracija predviđa svega nekoliko ili nula otkrića.

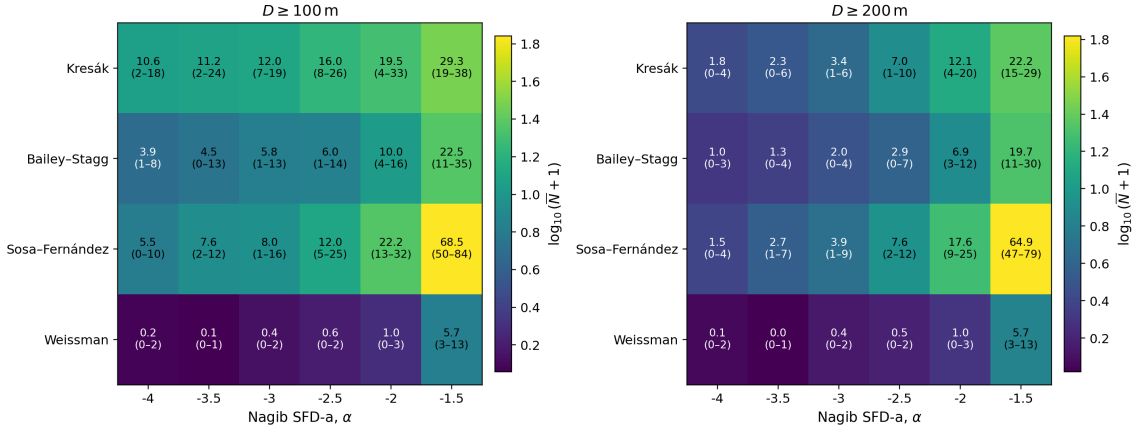


Slika 4.1: Srednji broj otkrića međuzvezdanih objekata kroz ispitani prostor parametara za aktivne (levo) i neaktivne (desno) objekte. Svaka ćelija objedinjuje rezultate 21 ispitnog kinematičkog sastava za fiksni nagib SFD-a i fotometrijski model. Boja predstavlja $\log_{10}(\bar{N} + 1)$, gde je $\bar{N}$ prosek broja otkrića kroz sve ispitane kinematičke sastave. Unutar svake ćelije prikazan je i raspon od najmanjeg do najvećeg dobijenog broja otkrića.

Kod neaktivnih populacija broj otkrića je znatno manji. Za $\alpha \leq -2.5$ srednji broj otkrića ostaje manji od jedan za sve ispitane modele albeda, dok se veće vrednosti pojavljuju prvenstveno kod najpliće ispitane raspodele, $\alpha = -1.5$. Kada je albedo u pitanju, najoptimističnije rezultate očekivano daje $p = 0.20$, za koji je uz $\alpha = -1.5$ dobijeno u proseku 4.5 otkrivenih objekata kroz ispitane kinematičke sastave, uz raspon od 1 do 11 objekata.

Najveći broj otkrića, 4936, dobijen je za aktivnu populaciju sastavljenu isključivo od objekata tankog diska, sa nagibom $\alpha = -4.0$ i Kresákovim modelom kometarne aktivnosti. Ova kombinacija spaja najstrmiji simulirani SFD, koji proizvodi veoma veliki broj malih objekata, sa modelom aktivnosti koji je posebno povoljan za detekciju malih jezgara, pa veliki broj otkrivenih objekata iz ove kombinacije potiče od veoma sjajnih malih tela prečnika između 10 i 100 metara. Upravo ovakva tela su problematična u našoj simulaciji, jer rad Cook i dr. [4], iz kog su preuzeti modeli kometarne aktivnosti, koristi minimalni poluprečnik jezgra od 0.1 km, dok je u ovom radu simulacija proširena do poluprečnika od 5 m. Zbog toga su rezultati dodatno razmotreni nakon izdvajanja samo otkrivenih objekata sa prečnicima $D \geq 100$ m i $D \geq 200$ m. Prva granica odgovara veličini iznad koje je definisana referentna brojna gustina $n_0 = 0.1 \text{ au}^{-3}$, dok druga odgovara minimalnom prečniku jezgra u nominalnom aktivnom modelu Cook i dr. [4].

Efekat ograničavanja prečnika najjasnije se vidi kod Kresákovog modela i najstr-



Slika 4.2: Broj otkrivenih aktivnih međuzvezdanih objekata tokom prve godine LSST nakon ograničavanja na objekte sa $D \geq 100$ m (levo) i $D \geq 200$ m (desno). Svaka ćelija prikazuje srednju vrednost broja otkrića kroz 21 ispitani kinematički sastav i raspon od najmanje do najveće dobijene vrednosti. Granica od 100 m odgovara veličini iznad koje je definisana referentna brojna gustina korišćena u ovom radu, dok $D = 200$ m odgovara minimalnom prečniku jezgra nominalnog aktivnog modela iz rada Cook i dr. [4].

mijih SFD-ova. Za $\alpha = -4.0$ prosečan broj otkrića kroz ispitane kinematičke sastave opada sa približno 1914 u punom uzorku na 10.62 kada se zadrže samo objekti sa $D \geq 100$ m, odnosno na 1.8 za $D \geq 200$ m. U konfiguraciji koja je dala najveći pojedinačni broj otkrića, 4936, samo 15 otkrivenih objekata ima $D \geq 100$ m, a svega 3 imaju $D \geq 200$ m. Zato ovaj broj malih aktivnih objekata treba interpretirati kao pokazatelj osetljivosti simulacije na najmanja aktivna jezgra, a ne kao očekivani broj otkrića tokom prve godine LSST-a.

Kod neaktivnih populacija je ovaj efekat značajno slabiji, i među 245 otkrića u modelima sa konstantnim albedom, samo 9 pripada objektima sa $D < 100$ m. Zavisnost ovih rezultata od nagiba SFD-a i modela kometarnog sjaja detaljnije je razmotrena u naredne dve sekcije.

Dobijeni brojevi otkrića se mogu okvirno uporediti sa ranijim prognozama LSST otkrića međuzvezdanih objekata. Pojedinačni rezultati se ne mogu direktno porediti zbog različitih normalizacija populacije, fotometrijskih pretpostavki i kriterijuma otkrića, ali prethodni radovi na ovu temu daju koristan pregled raspona dobijenih različitim pristupima ovom problemu. Tabela 4.2 prikazuje nekoliko relevantnih procena.

U tom kontekstu, rezultati neaktivnih populacija u ovom radu ne odstupaju mnogo od ranijih prognoza. Dobijeni raspon od 0 do 11 otkrića tokom prve godine

Tabela 4.2: Primeri prethodnih procena očekivanog broja LSST otkrića međuzvezdanih objekata.

Rad	Procena	Period	Osnovne pretpostavke
Cook i dr. [4]	0.001–10	10 god.	Modelovani i aktivni i neaktivni međuzvezdani objekti; normalizacija populacije zasnovana na procenama pre otkrića 1I/'Oumuamua; razmatran širok opseg SFD-a i modela kometarnog sjaja.
Hoover, Seligman i Payne [13]	~ 15	10 god.	Neaktivni, 'Oumuamua-like objekti sa $H = 22.4$; detaljno modelovana galaktička kinematika, bez eksplicitne SFD raspodele u osnovnoj proceni.
Marčeta i Seligman [19]	$\sim 0\text{--}70$	1 god.	Neaktivni objekti; $n_0 = 0.1 \text{ au}^{-3}$ za $D > 100 \text{ m}$; varirani SFD, albedo i kinematika; za otkriće zahtevane najmanje tri detekcije.
Dorsey i dr. [7]	6–51	10 god.	Neaktivni objekti iz Ōtautahi–Oxford modela; varirana raspodela apsolutnih magnituda, detaljna LSST kadenca, efekat razmazivanja signala i višenoćni SSP kriterijum otkrića.

nalazi se unutar širokog opsega koji su za neaktivne ISO dobili Marčeta i Seligman [19], dok Dorsey i dr. [7] takođe predviđaju broj otkrića reda nekoliko objekata godišnje. Znatno veći brojevi pojavljuju se samo kod pojedinih aktivnih konfiguracija, prvenstveno pri strmim SFD-ovima.

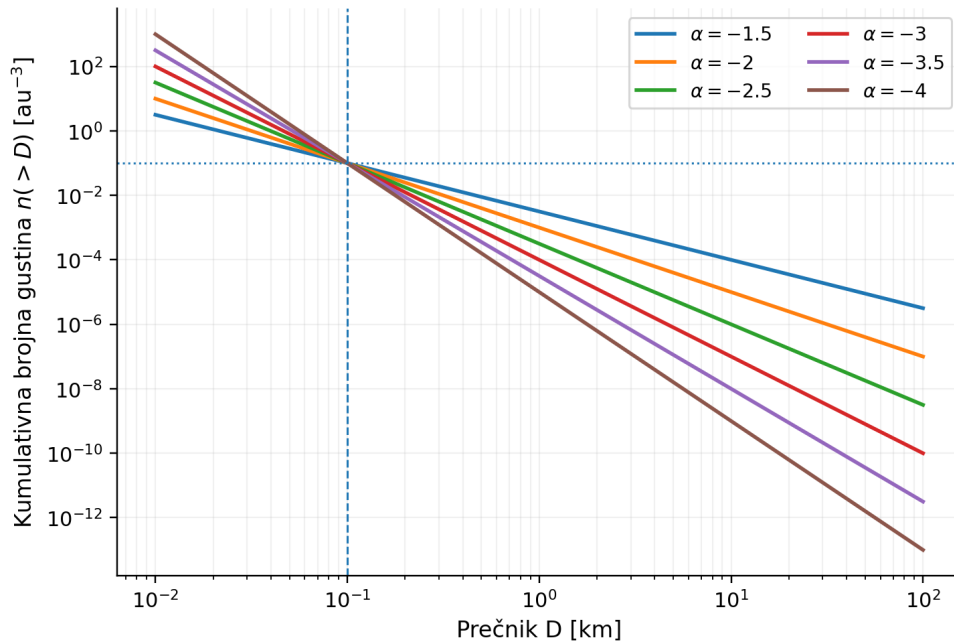
Pregled celog parametarskog prostora takođe pokazuje da se razlike u broju otkrića ne mogu pripisati samo jednom svojstvu populacije. Slični rezultati pojavljuju se za različite kombinacije SFD-a, fotometrijskih osobina i kinematičkog sastava, a značaj ovih parametara nije isti i za aktivne i neaktivne populacije. Zbog toga su u narednim sekcijama ovi uticaji razmotreni odvojeno, počevši od zavisnosti broja otkrića od nagiba SFD-a.

4.2 Uticaj nagiba SFD-a na LSST detektabilnost

Sve populacije razmatrane u ovom radu normalizovane su na istu brojnu gustinu objekata većih od referentnog prečnika $D_{\text{ref}} = 100 \text{ m}$, ali promena nagiba raspodele menja relativni broj tela sa prečnicima manjim i većim od referentnog, pa populacije generisane sa različitim nagibima SFD-a mogu dati veoma različite brojeve objekata.

Ova razlika postaje veoma velika na donjem kraju simuliranog opsega, gde pri $\alpha = -1.5$ odnos broja objekata sa $D > 10$ m i $D > 100$ m iznosi približno 32, ali za $\alpha = -4.0$ dostiže 10^4 . Drugim rečima, dve populacije sa istom brojnom gustinom objekata većih od 100 m mogu se razlikovati za više od dva reda veličine kada je u pitanju relativna zastupljenost najmanjih objekata.

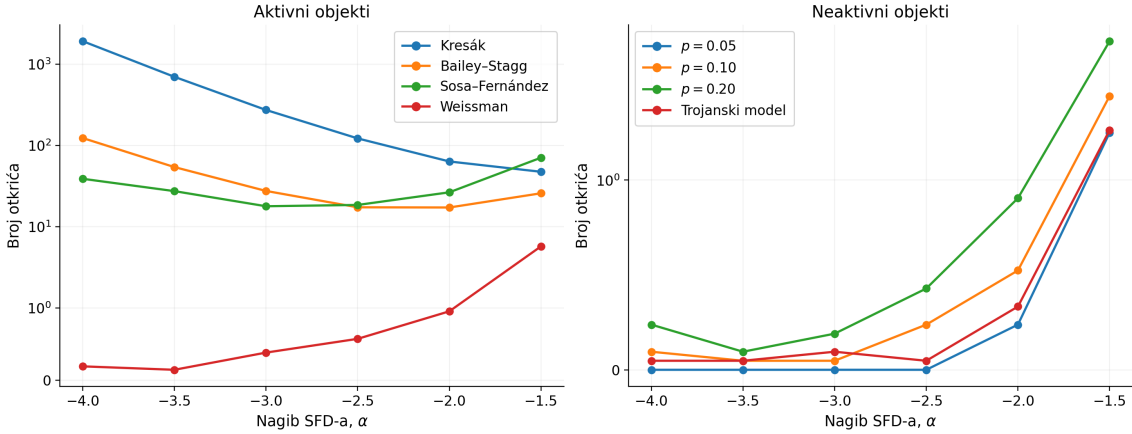
Na slici 4.3 prikazane su kumulativne raspodele veličina objekata korišćene u simulacijama. Sve raspodele imaju istu brojnu gustinu na referentnom prečniku, ali se ispod ove granice brzo razilaze sa promenom nagiba SFD-a.



Slika 4.3: Kumulativna brojna gustina objekata u zavisnosti od prečnika za šest korišćenih nagiba SFD-a.

Međutim, ova eksplozija broja malih tela ne garantuje i srazmeran rast broja otkrića. Na slici 4.4 prikazan je prosečan broj otkrivenih objekata u zavisnosti od nagiba SFD-a za sve korišćene fotometrijske modele.

Uticaj nagiba SFD-a je relativno jednostavan kod neaktivnih objekata, jer je njihov sjaj određen pre svega njihovim prečnikom i albedom, bez dodatne neizvesnosti vezane za model kometarne aktivnosti. Najveći broj otkrića je za sva četiri modela albeda dobijen za najplići SFD, $\alpha = -1.5$, dok sa povećanjem apsolutne vrednosti nagiba broj otkrivenih objekata brzo opada. Za konstantni albedo $p = 0.20$, koji daje najveći broj otkrića među neaktivnim modelima, prosek opada sa 4.48 objekata pri $\alpha = -1.5$ na 0.90 pri $\alpha = -2.0$, a za još strmije SFD-ove ostaje ispod



Slika 4.4: Prosečan broj otkrića tokom prve godine pregleda u zavisnosti od nagiba SFD-a za aktivne (levo) i neaktivne (desno) populacije. Tačke predstavljaju srednju vrednost kroz 21 ispitani kinematički sastav.

jednog objekta. Isti trend, uz manje apsolutne brojeve otkrića, pojavljuje se i za ostale vrednosti albeda.

Da ovaj pad nije posledica samo nekoliko posebno nepovoljnih konfiguracija vidi se i iz broja simulacija bez ijednog otkrivenog objekta. Pri $\alpha = -1.5$ nula otkrića dobijena je u 9 od 84, odnosno oko 11% ispitanih konfiguracija. Ovaj udeo raste na oko 61% pri $\alpha = -2.0$ i približno 85% pri $\alpha = -2.5$, dok za još strmije SFD-ove bez otkrića ostaje 90% ili više konfiguracija, i ovakav rezultat pokazuje da veliki porast ukupnog broja objekata pri strmijim SFD-ovima ne dovodi nužno i do većeg broja otkrića.

Sličan zaključak za male neaktivne ISO dobijen je i u ranijim simulacijama. Ezell i Loeb [10] razmatraju objekte prečnika od 1 do 50 m i nalaze da u ovom intervalu očekivani broj LSST detekcija raste sa prečnikom, jer najmanji objekti ostaju u oblasti u kojoj su detektabilni veoma kratko. Marčeta i Seligman [19], koji simuliraju neaktivne ISO do prečnika od 10 m, navode da njihovi rezultati nisu osetljivi na tačnu vrednost donje granice veličine. U oba slučaja, velika brojnost najmanjih objekata ne uspeva da nadoknadi njihovu znatno slabiju detektabilnost.

Kod aktivnih objekata rezultat je znatno složeniji, i zavisnost broja otkrića od nagiba SFD-a snažno zavisi od izbora modela kometarne aktivnosti. Najizraženiji rast dobijen je za Kresákov model, kod kog prosečan broj otkrića raste sa približno 48 pri $\alpha = -1.5$ na oko 1900 pri $\alpha = -4.0$. Bailey-Staggov model nema monotonu zavisnost, dok Sosa-Fernándezov i Weissmanov model najveći broj otkrića daju pri $\alpha = -1.5$. Uticaj SFD-a na aktivne populacije zato na prvi pogled nema jedinstven

smer.

Međutim, ova razlika gotovo potpuno nestaje kada se izuzmu najmanji objekti. Kada se zadrže samo otkriveni objekti sa $D \geq 100$ m, svi razmatrani modeli pokazuju isti osnovni trend kao neaktivne populacije. Kod Kresákovog modela prosečan broj otkrića tada opada sa 29.30 pri $\alpha = -1.5$ na 10.62 pri $\alpha = -4.0$, kod Bailey–Staggovog sa 22.48 na 3.86, a kod Sosa–Fernándezovog sa 68.48 na 5.48. Kod Weissmanovog modela broj otkrića je mali kroz veći deo razmatranog prostora, ali se dobija isti opšti pad. Isti trend postaje još izraženiji kada se uzorak ograniči na $D \geq 200$ m, gde svi aktivni modeli pri $\alpha = -4.0$ daju manje od dva otkrića u proseku kroz 21 različiti kinematički sastav.

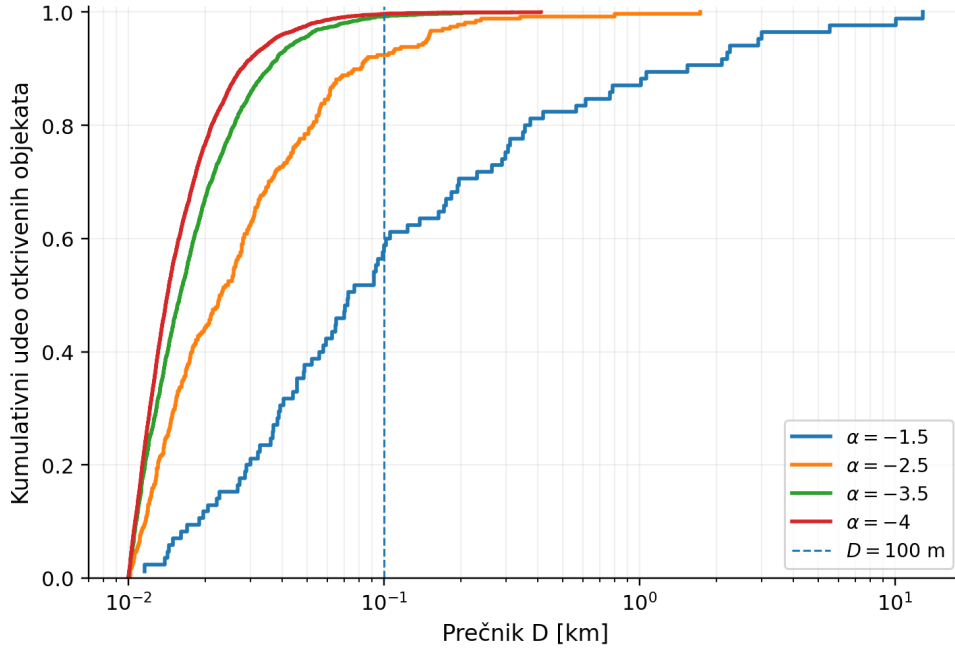
Veliki rast broja otkrića Kresákovog modela prema strmim SFD-ovima zato gotovo u potpunosti potiče od objekata sa $D < 100$ m. Kod neaktivnih populacija doprinos ovih objekata je veoma mali, pa samo 9 od 245 otkrića u svim konfiguracijama sa konstantnim albedom pripada objektima manjim od 100 m.

Za razliku od neaktivnih objekata, kod aktivnih populacija donji kraj raspodele veličina može imati veoma veliki uticaj na ukupan broj otkrića. Slična osetljivost broja aktivnih ISO na donji kraj raspodele veličina pojavljuje se i u simulacijama Cook i dr. [4]. U njihovom modelu povećanje minimalnog poluprečnika aktivnog jezgra značajno smanjuje očekivani broj LSST detekcija. Dobijeni rezultati pokazuju isti osnovni efekat, odnosno da veliki broj najmanjih aktivnih jezgara može imati veoma veliki uticaj na ukupan broj otkrića.

Ovaj efekat se neposredno vidi i u raspodeli prečnika otkrivenih objekata. Na slici 4.5 prikazana je kumulativna raspodela prečnika za Kresákov model i čistu populaciju tankog diska, pri čemu je između prikazanih simulacija menjan samo nagib SFD-a.

Pri $\alpha = -1.5$ otkriveni objekti obuhvataju širok raspon prečnika, dok se sa povećanjem apsolutne vrednosti nagiba SFD-a raspodela brzo pomera ka manjim objektima. Pri $\alpha = -3.5$ i -4.0 velika većina otkrića u ovom modelu pripada objektima manjim od 100 m, odnosno upravo delu populacije koji je odgovoran za veliki rast ukupnog broja otkrića. Sličan efekat dobijen je i u radu Marčeta i Seligman [19], gde strmiji SFD-ovi takođe daju veći broj malih detektabilnih ISO i značajno menjaju karakteristične veličine objekata koje bi LSST mogao da otkrije.

Rezultati ove sekcije zato pokazuju da uticaj SFD-a na broj otkrića zavisi i od toga koji deo raspodele veličina može da doprinese detekcijama. Kod neaktivnih populacija, kao i kod aktivnih objekata većih od 100 m, strmiji SFD-ovi daju manji



Slika 4.5: Kumulativna raspodela prečnika otkrivenih objekata za Kresákov model i čistu populaciju tankog diska, za nekoliko vrednosti nagiba SFD-a. Fotometrijski model i kinematički sastav populacije isti su u svim prikazanim slučajevima.

broj otkrića. Kod aktivnih populacija, međutim, veliki broj objekata ispod 100 m može značajno povećati broj otkrića, pa čak i preokrenuti ovaj trend. Koliki će njihov doprinos biti zavisi od usvojenog modela kometarne aktivnosti, što je detaljnije razmotreno u narednoj sekciji.

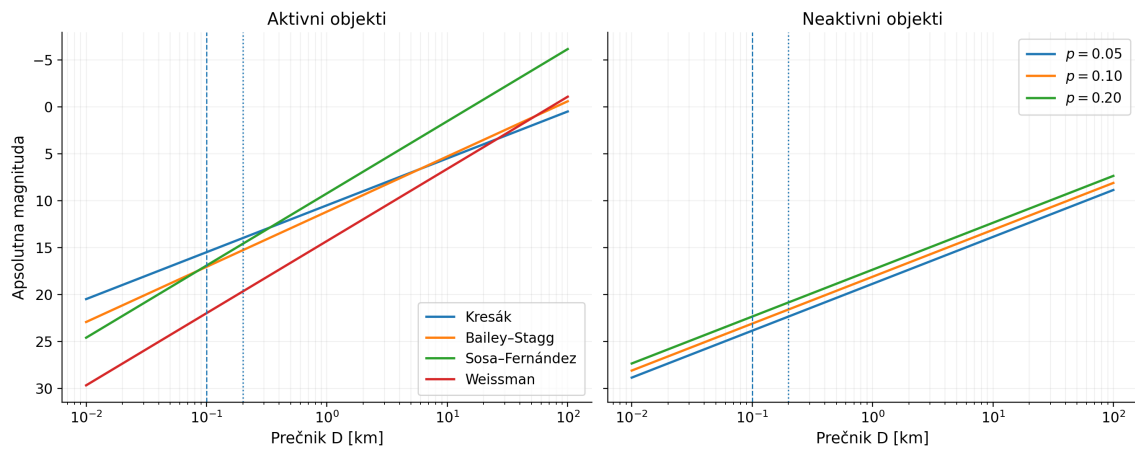
4.3 Uticaj albeda i kometarne aktivnosti na LSST detektabilnost

U prethodnoj sekciji pokazano je da se kod aktivnih populacija zavisnost broja otkrića od nagiba SFD-a značajno menja sa izborom modela kometarne aktivnosti. Ova razlika je najizraženija kod najmanjih objekata, čiji broj pri strmim SFD-ovima brzo raste i kod pojedinih modela daje veliki deo ukupnog broja otkrića. Da bi se objasnilo zašto isti SFD kod različitih modela aktivnosti proizvodi suprotne trendove, potrebno je pogledati kako korišćeni fotometrijski modeli povezuju fizičku veličinu objekta sa njegovim sjajem.

Kod aktivnih objekata korišćene su četiri empirijske relacije kometarnog sjaja preuzete iz Cook i dr. [4]. Različiti modeli koriste različite vrednosti parametara b_1 i

b_2 u vezi između prečnika jezgra i kometarne apsolutne magnitude iz jednačine 3.3.6. U svim simulacijama korišćena je ista vrednost fotometrijskog indeksa $n = 4$, pa razlike između četiri modela prvenstveno potiču od različite kometarne apsolutne magnitude koja se dodeljuje jezgru zadatog prečnika.

Kod neaktivnih objekata je veza jednostavnija. Njihova apsolutna magnituda je određena prečnikom i albedom, pa veći albedo pri istom prečniku daje svetliji objekat. Veze između veličine i sjaja za sve korišćene aktivne i neaktivne modele prikazane su na slici 4.6.



Slika 4.6: Zavisnost apsolutne magnitude od prečnika za korišćene fotometrijske modele. Levo su prikazani aktivni objekti, a desno neaktivni objekti sa konstantnim albedima. Vertikalne linije označavaju $D = 100$ m i $D = 200$ m

Na slici 4.6 se vidi kako se međusobna razlika između aktivnih modela menja sa promenom veličine jezgara objekata. Kresákov i Sosa–Fernándezov model daju isti sjaj pri $D \simeq 0.34$ km, dok Kresákov model daje svetlije objekte ispod ove veličine, a za veća jezgra je svetliji Sosa–Fernándezov model. Zbog toga promena relativne zastupljenosti malih i velikih objekata unutar neke populacije može promeniti i odnos očekivanih brojeva otkrića između ova dva modela.

Karakteristične vrednosti kometarne apsolutne magnitude na dve veličine koje su posebno značajne za ovaj rad date su u tabeli 4.3.

Raspon kometarne apsolutne magnitude između najsvetlijeg i najtamnijeg korišćenog modela iznosi oko 5.7 magnituda već pri $D = 200$ m, dok na donjoj granici simuliranog intervala, $D = 10$ m, raste na približno 9.2 magnituda. Razlike između fotometrijskih pretpostavki zato se naročito pojačavaju upravo u delu populacije koji pri strmim SFD-ovima postaje najbrojniji.

Tabela 4.3: Kometarna apsolutna magnituda koju četiri korišćene empirijske relacije dodeljuju jezgrima prečnika 100 m i 200 m.

Model	$H_c(100 \text{ m})$	$H_c(200 \text{ m})$
Kresák	15.50	13.99
Bailey–Stagg	17.06	15.29
Weissman	22.00	19.68
Sosa–Fernández	16.92	14.61

Takođe, velika zavisnost broja otkrića od fotometrijskog modela ostaje prisutna i kada se izuzme uticaj najmanjih objekata. Za $D \geq 200 \text{ m}$ i $\alpha = -1.5$ prosečan broj otkrića kroz ispitane kinematičke sastave iznosi 64.90 za Sosa–Fernándezov model, 22.24 za Kresákov, 19.71 za Bailey–Staggov i 5.71 za Weissmanov model. Izbor relacije kometarnog sjaja tako i unutar opsega veličina nominalno obuhvaćenog modelom iz Cook i dr. [4] može menjati očekivani broj otkrića za više od jednog reda veličine.

Prema tome, deo velikih razlika između aktivnih modela pri strmim SFD-ovima potiče od veoma malih jezgara, gde na rezultat utiče i ekstrapolacija korišćenih relacija. Međutim, poređenje za $D \geq 200 \text{ m}$ pokazuje da izbor modela kometarnog sjaja ostaje veoma značajan i kada se najmanji objekti isključe. Veliki raspon dobijenih brojeva otkrića zato nije samo posledica ponašanja modela na donjem kraju simuliranog intervala.

Kod neaktivnih objekata zavisnost od albeda je jednostavnija. Za objekat fiksnog prečnika promena apsolutne magnitude pri promeni albeda može se zapisati kao

$$\Delta H = -2.5 \log_{10} \left(\frac{p_2}{p_1} \right). \quad (4.3.1)$$

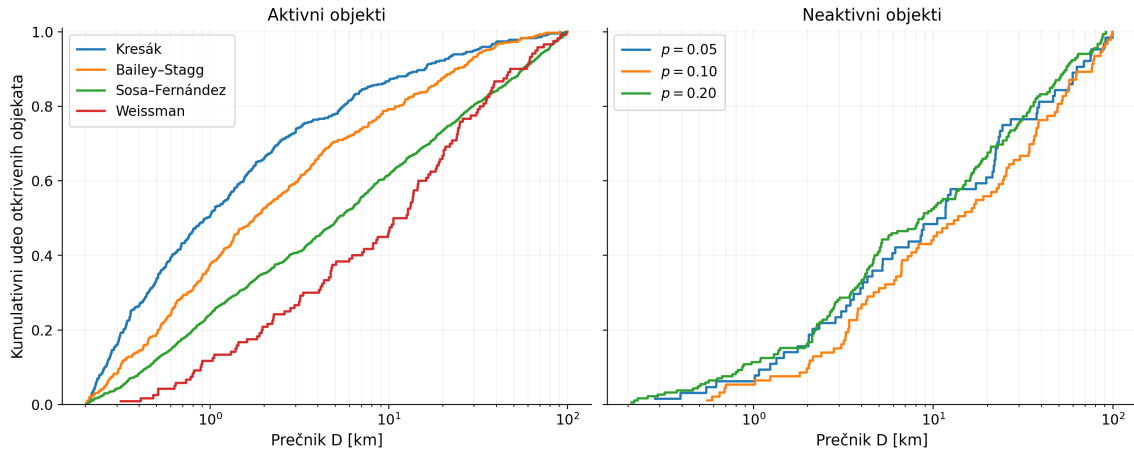
Povećanje albeda sa $p = 0.05$ na $p = 0.20$ zato objekat iste veličine čini svetlijim za približno 1.5 magnituda.

Promena sjaja neposredno se prenosi i na broj otkrića. Pri $\alpha = -1.5$ prosečan broj otkrivenih objekata raste sa 1.67 za $p = 0.05$, preko 2.48 za $p = 0.10$, do 4.48 za $p = 0.20$. Populacija sa $p = 0.20$ tako daje 2.7 puta više otkrića od populacije sa $p = 0.05$, pri istoj brojnoj gustini i istom SFD-u. Isti trend prisutan je i za ostale razmatrane nagibe SFD-a, iako kod strmijih raspodela apsolutni broj otkrića brzo opada.

Za razliku od prethodna tri modela sa konstantnim albedom, empirijski model zasnovan na Jupiterovim trojancima svakom objektu nezavisno dodeljuje vrednost iz raspodele albeda čija je medijana približno $p = 0.07$. Pri $\alpha = -1.5$ ovaj model

daje u proseku 1.71 otkrivenih objekata, dok pri $\alpha = -2.0$ prosek opada na 0.33. Obe vrednosti nalaze se između odgovarajućih rezultata za modele sa konstantnim albedima $p = 0.05$ i $p = 0.10$, tako da empirijska raspodela daje rezultate koji su u skladu sa trendovima koje smo već utvrdili na modelima sa konstantnim albedom.

Izbor fotometrijskog modela odražava se i na raspodelu veličina objekata koji će biti uspešno otkriveni. Na slici 4.7 su prikazane kumulativne raspodele prečnika dobijene objedinjavanjem otkrivenih objekata iz svih kinematičkih sastava, pri čemu su uzeti u obzir samo objekti sa $D \geq 200$ m. Za ovo poređenje izabran je slučaj $\alpha = -1.5$, jer i nakon ovog ograničenja daje dovoljno veliki broj otkrića za sve razmatrane fotometrijske modele.



Slika 4.7: Kumulativne raspodele prečnika otkrivenih objekata za $\alpha = -1.5$ i $D \geq 200$ m. Levo su prikazana četiri modela aktivnih objekata, a desno tri modela neaktivnih objekata sa konstantnim albedom. Za zadatu vrednost D , vrednost na y -osi predstavlja udeo otkrivenih objekata sa prečnikom manjim ili jednakim D ; presek krive sa $y = 0.5$ zato odgovara medijani prečnika. Raspodele objedinjuju sve ispitane kinematičke sastave. Za neaktivne modele objedinjene su dve nezavisne realizacije. Empirijski model nije prikazan jer za njega nisu dostupni pojedinačni prečnici otkrivenih objekata.

Kod aktivnih objekata izbor modela značajno menja i raspodelu veličina otkrivenih objekata. Medijana prečnika se kreće od 0.94 km za Kresákov model do 11.59 km za Weissmanov, što predstavlja razliku veću od jednog reda veličine. Bailey–Staggov model daje medijanu od 1.76 km, a Sosa–Fernándezov od 5.17 km. Izbor modela kometarnog sjaja zato ne utiče samo na ukupan broj otkrića, već značajno menja i raspodelu veličina uspešno otkrivenih objekata. Kod neaktivnih modela razlike u raspodelama veličina su znatno manje izražene, pa se uticaj albeda jasnije vidi u ukupnom broju otkrića.

Tabela 4.4: Kvartili raspodele prečnika otkrivenih objekata prikazanih na slici 4.7. Za aktivne modele korišćena je prva realizacija, dok su za neaktivne modele sabrane obe nezavisne realizacije.

Tip	Model	N	Q_{25} [km]	Medijana [km]	Q_{75} [km]
aktivni	Kresák	467	0.36	0.94	3.29
aktivni	Bailey–Stagg	414	0.61	1.76	7.68
aktivni	Weissman	120	2.76	11.59	24.84
aktivni	Sosa–Fernández	1363	1.03	5.17	22.22
neaktivni	$p = 0.05$	64	3.23	11.09	24.94
neaktivni	$p = 0.10$	93	3.80	13.75	38.28
neaktivni	$p = 0.20$	185	2.73	8.73	29.43

Poređenje aktivnih i neaktivnih populacija pokazuje da uticaj fotometrijskih pretpostavki nije isti u oba slučaja. Kod neaktivnih objekata albedo prvenstveno menja ukupan broj otkrića, dok kod aktivnih objekata različite veze između veličine jezgra i kometarnog sjaja menjaju i broj otkrića i raspodelu veličina otkrivenih objekata. Zbog toga isti ili sličan broj LSST otkrića može odgovarati različitim kombinacijama nagiba SFD-a i fotometrijskih osobina populacije, te sam ukupan broj otkrivenih objekata zato nije dovoljan da se ove osobine međusobno razdvoje.

Do sada su razmatrani uticaji raspodele veličina i fotometrijskih osobina populacije, ali na detektabilnost međuzvezdanih objekata snažno utiču i njihova kinematička svojstva. Različite raspodele brzina i pravaca dolaska menjaju način na koji objekti prolaze kroz prostor u kom ih LSST može posmatrati, pa je u narednoj sekciji ispitano i kako kinematički sastav ISO populacije utiče na broj i osobine objekata koje LSST može da otkrije.

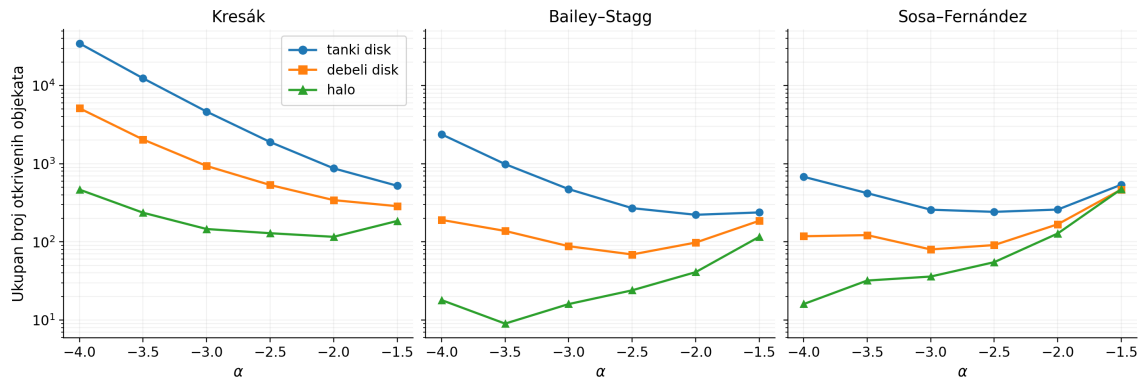
4.4 Uticaj kinematičkog sastava populacije na LSST detektabilnost

Treću grupu variranih parametara čini kinematički sastav populacije. U ovom radu odvojeno su modelovane kinematike tankog diska, debelog diska i galaktičkog haloa, a zatim je ispitana mreža od 21 kombinacije njihovih udela, sa korakom od po 20%. Cilj ove sekcije je da ispita kako i koliko ove kinematičke osobine utiču na detektabilnost međuzvezdanih objekata.

Za svaki otkriveni simulirani međuzvezdani objekat sačuvana je i pripadnost kinematičkoj komponenti, pa se za poređenje mogu iskoristiti i otkrića iz mešovitih

populacija, a ne samo iz onih populacija u kojima svi objekti imaju kinematička svojstva zasnovana na istoj galaktičkoj populaciji. Kada se sve konfiguracije posmatraju zajedno, ukupna brojna gustina objekata tankog diska, debelog diska i haloa je ista. Zbog toga su ukupni brojevi otkrivenih objekata iz svake od tri komponente direktno uporedivi.

Kod aktivnih objekata se razlika u detektabilnosti između kinematičkih komponenti vidi već na prvi pogled. Na slici 4.8 prikazan je ukupan broj otkrivenih objekata sa kinematičkim karakteristikama tankog diska, debelog diska i haloa, odvojeno za različite nagibe SFD-a. Prikazani su Kresák, Bailey–Staggov i Sosa–Fernándezov model, dok je Weissmanov model izostavljen zbog malog broja otkrivenih objekata.

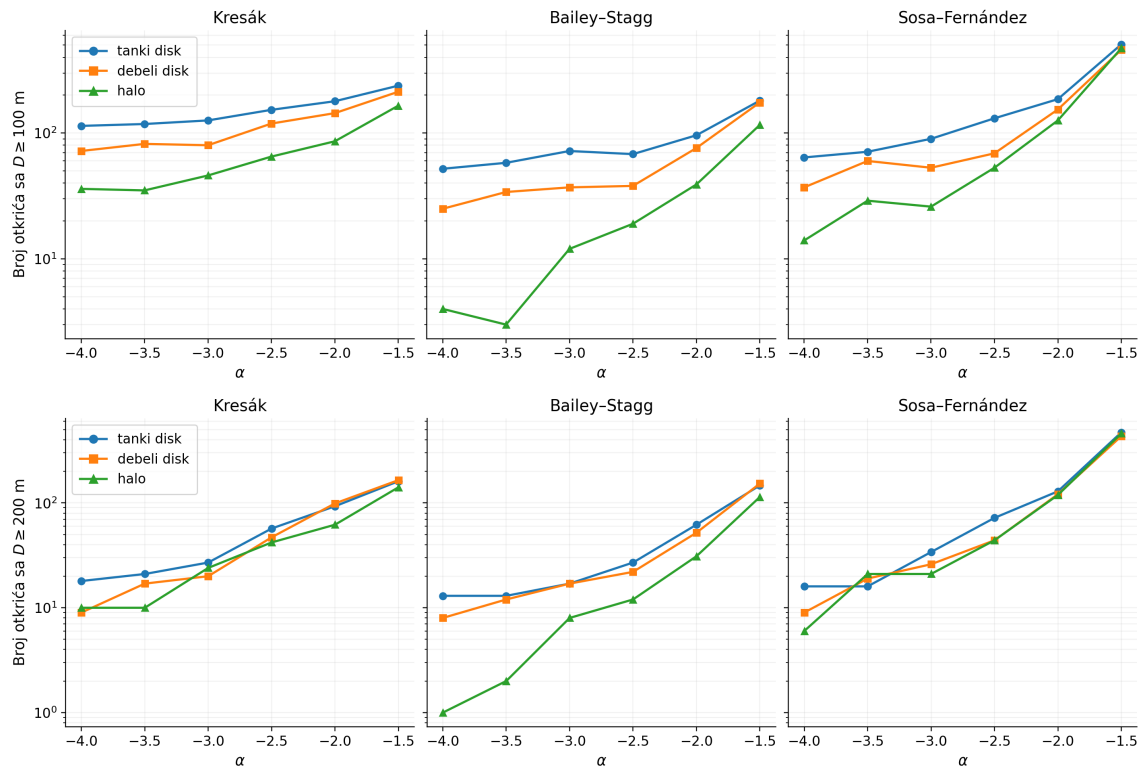


Slika 4.8: Ukupan broj otkrivenih aktivnih objekata sa kinematičkim karakteristikama tankog diska, debelog diska i galaktičkog haloa, za različite nagibe SFD-a. Zbog simetrične konstrukcije mreže ukupna zastupljenost sve tri komponente je jednaka, pa su njihovi brojevi otkrića direktno uporedivi.

Pri svakom od tri prikazana modela kometarne aktivnosti, objekti sa kinematikom tankog diska su otkriveni najveći broj puta, objekti debelog diska nešto ređe, dok halo daje najmanji broj otkrića. Međutim, veličina ove razlike nije konstantna, već snažno zavisi od nagiba SFD-a. Ovo se posebno jasno vidi kod Sosa–Fernándezovog modela, gde je pri $\alpha = -1.5$ otkriveno 539 objekata tankog diska, 468 objekata debelog diska i 473 objekta haloa, dok se za $\alpha = -4$ dobijaju brojevi 680, 118 i 16. Sličan je slučaj i kod ostala dva modela, gde je takođe uočljiv trend da se sa povećanjem apsolutne vrednosti nagiba SFD-a povećava i uticaj kinematike samih objekata. Posmatrano kroz svih 18 prikazanih kombinacija modela aktivnosti i nagiba SFD-a, tanki disk daje najveći broj otkrića u svih 18 slučajeva, dok je halo najslabije zastupljen u 17. Jedini izuzetak predstavlja Sosa–Fernándezov model pri $\alpha = -1.5$, gde su brojevi objekata debelog diska i haloa skoro jednaki. Pošto ovakvi nagibi SFD-a imaju veću zastupljenost velikih objekata, ovakvo približavanje kine-

matičkih komponenti ukazuje na mogućnost da jačina kinematičke selekcije zavisi i od veličine objekata, što je razmotreno u nastavku.

Kao što je pokazano u prethodnim sekcijama, kod strmih SFD-ova veliki deo otkrića pojedinih aktivnih modela potiče od jezgara manjih od 200 m, što je oblast u kojoj su korišćene empirijske relacije kometarnog sjaja ekstrapolirane na objekte manje nego što je razmatrano u radu Cook i dr. [4]. Zbog toga je analiza uticaja kinematike ponovljena nakon naknadnog ograničavanja već otkrivenih objekata na objekte koji zadovoljavaju $D \geq 100$ m i $D \geq 200$ m.



Slika 4.9: Ukupan broj otkrivenih aktivnih objekata sa kinematičkim karakteristikama tankog diska, debelog diska i galaktičkog haloa, za različite nagibe SFD-a, sa uvedenom donjom granicom prečnika (100 m za gornja tri dijagrama i 200 m za donja tri dijagrama), kako bi se ispitao uticaj veličine objekata na izraženost kinematičke selekcije.

Ograničavanje uzorka na veće objekte pokazuje da kinematička selekcija nije posledica isključivo najmanjih aktivnih jezgara, ali i da njena jačina snažno zavisi od njihovog prisustva. Za $D \geq 100$ m tanki disk daje najveći broj otkrića u svih 18 prikazanih kombinacija modela aktivnosti i nagiba SFD-a, dok halo daje najmanji broj u 17 od 18 slučajeva. Ipak, razlike između komponenti znatno su manje nego kada su uključeni i najmanji objekti.

Pri konzervativnijoj granici $D \geq 200$ m razlike se dodatno smanjuju, a u većem delu parametarskog prostora više nije prisutan jednostavan i izražen redosled tanki disk–debeli disk–halo. Ovo je posebno jasno kod plitkih SFD-ova. Na primer, za Sosa–Fernándezov model sa $\alpha = -1.5$ broj otkrića iznosi 539, 468 i 473 u punom uzorku, 507, 459 i 472 za $D \geq 100$ m, a 471, 433 i 459 za $D \geq 200$ m, za tanki disk, debeli disk i halo redom. Među najvećim objektima tri kinematičke komponente zato daju sličan broj otkrića. Ovakvo smanjivanje razlika između različitih kinematičkih komponenti pri većim prečnicima je u skladu i sa prethodno uočenim slabljenjem kinematičke selekcije prema plitkim SFD-ovima, u kojima su veći objekti zastupljeniji.

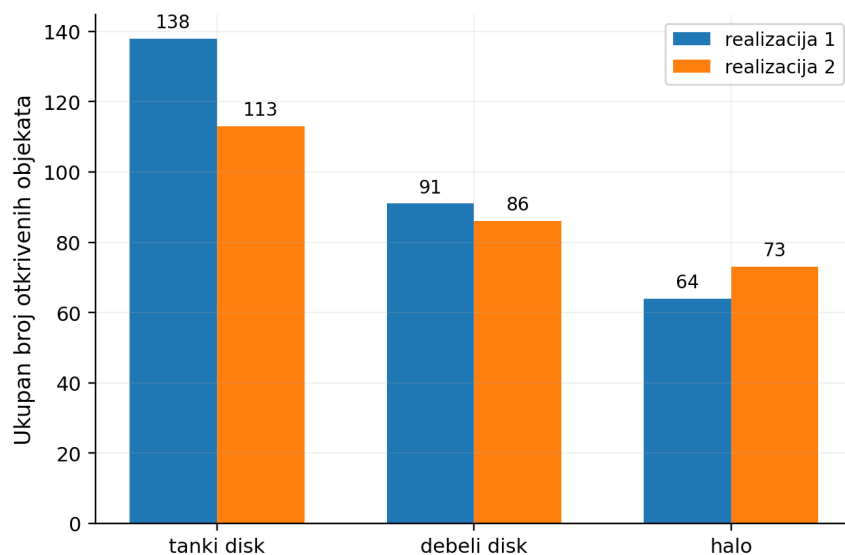
Ovo ukazuje na to da mali objekti nisu jedini koji trpe kinematičku selekciju, ali da je ona kod njih značajno izraženija. Objašnjenje koje se nameće je da manji objekti postaju dovoljno sjajni za otkrivanje samo u ograničenijem delu svojih putanja i pri povoljnijim geometrijama posmatranja, zbog čega razlike u brzinama objekata mogu imati veći uticaj na vreme tokom kog su objekti detektabilni, njihove prividne ugaone brzine, kao i na efekat razmazivanja signala. Za veće objekte ovi faktori imaju manji značaj, pa je uticaj kinematičke selekcije manje izražen. Ovaj mehanizam je detaljnije ispitan u sekciji 4.5.

Rezultati zasebno dobijeni na neaktivnim populacijama ukazuju na to da kinematička selekcija nije specifična samo za korišćene modele kometarne aktivnosti. Ipak, kod neaktivnih populacija je broj otkrića znatno manji nego kod aktivnih, pa pojedinačne konfiguracije ne pružaju dovoljno dobar pregled razlika između kinematičkih komponenti. Kao dodatna provera, svih 504 neaktivnih konfiguracija simulirano je i u drugoj nezavisnoj realizaciji.

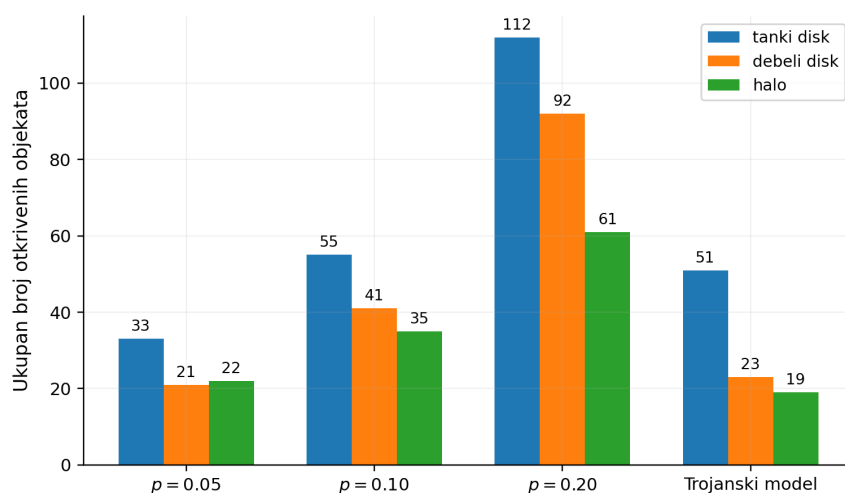
Na slici 4.10 prikazan je ukupan broj otkrivenih objekata sa karakteristikama svake od kinematičkih komponenta, odvojeno za dve realizacije. U prvom pokretanju dobijeno je 138 objekata tankog diska, 91 objekat debelog diska i 64 objekta haloa, a u drugom pokretanju odgovarajući brojevi iznose 113, 86 i 73. Iako se tačni brojevi razlikuju između realizacija, u obe se nezavisno dobija isti trend da najveći ukupan doprinos daje tanki disk, a najmanji halo.

Na slici 4.11 komponente su dodatno razdvojene prema korišćenom modelu albeda, i jasno se vidi da ovaj trend postoji pri sva četiri modela albeda.

Kada se dve realizacije posmatraju zajedno, dobijen je ukupno 251 objekat tankog diska, 177 objekata debelog diska i 137 objekata haloa. Pošto su sve tri komponente kroz kinematičku mrežu jednako zastupljene, to znači da broj otkrivenih



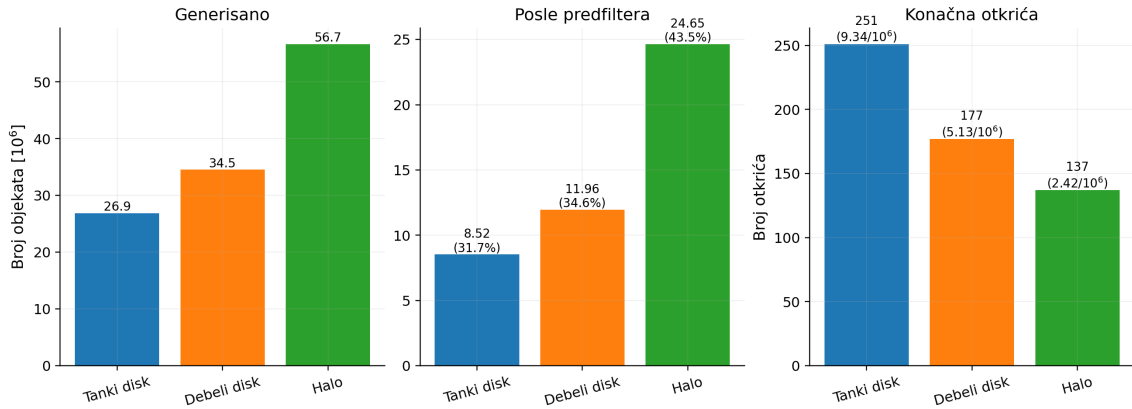
Slika 4.10: Ukupan broj otkrivenih neaktivnih objekata tankog diska, debelog diska i haloa kroz sve 504 konfiguracije, prikazan odvojeno za dve nezavisne realizacije.



Slika 4.11: Ukupan broj otkrivenih neaktivnih objekata za četiri razmatrana modela albeda, za svaku od tri kinematičke komponente. Za svaki model sabrana su otkrića kroz svih šest nagiba SFD-a i kroz obe nezavisne realizacije.

objekata debelog diska iznosi oko 70%, a haloa oko 55% broja objekata tankog diska. Čak i kada se razmotre samo neaktivni objekti sa $D \geq 200$ m u tri modela sa konstantnim albedom, kroz dve realizacije ostaje 175 otkrića objekata tankog diska, 154 debelog diska i 118 haloa. Neaktivne populacije tako nezavisno potvrđuju postojanje kinematičke selekcije i bez pretpostavki o kometarnoj aktivnosti.

Važno je naglasiti da ova razlika u broju otkrivenih objekata sa različitim kinematičkim svojstvima nije posledica toga što generator proizvodi manje objekata debelog diska ili haloa. Iako sve tri simulirane kinematičke komponente imaju isti ukupan udeo u zadatoj međuzvezdanoj brojnoj gustini, brže populacije prirodno imaju veći udeo u dolaznom fluksu, pa zato generator proizvodi najviše halo objekata, zatim objekata debelog diska, a najmanje objekata tankog diska. Isti redosled ostaje prisutan i nakon prefiltriranja, a potpuni preokret ovog redosleda u konačnim otkrićima zato nastaje tek tokom simulacija posmatranja unutar simulatora SORCHA, što ukazuje na to da jaka kinematička selekcija stvarno postoji. Na slici 4.12 prikazano je kako se ovaj odnos menja od generisane populacije do konačnog skupa otkrića.



Slika 4.12: Promena relativne zastupljenosti tri kinematičke komponente tokom simulacije neaktivnih populacija, za svih šest nagiba SFD-a, četiri modela albeda i obe nezavisne realizacije. Prikazani su brojevi generisanih objekata, brojevi objekata koji prolaze prefilter i konačni brojevi LSST otkrića. U srednjem panelu u zagradama je dat procenat generisanih objekata koji prolazi prefilter, dok je u desnom panelu u zagradama dat broj otkrića na milion generisanih objekata.

Kada se broj otkrića normalizuje brojem generisanih objekata, objekat sa kinematikom tankog diska u proseku 3.9 puta češće postaje otkriven nego halo objekat. Razlika je još veća ako se posmatraju samo objekti koji su već prošli prefilter, i među njima je efikasnost otkrivanja za objekte tankog diska 5.3 puta veća nego za

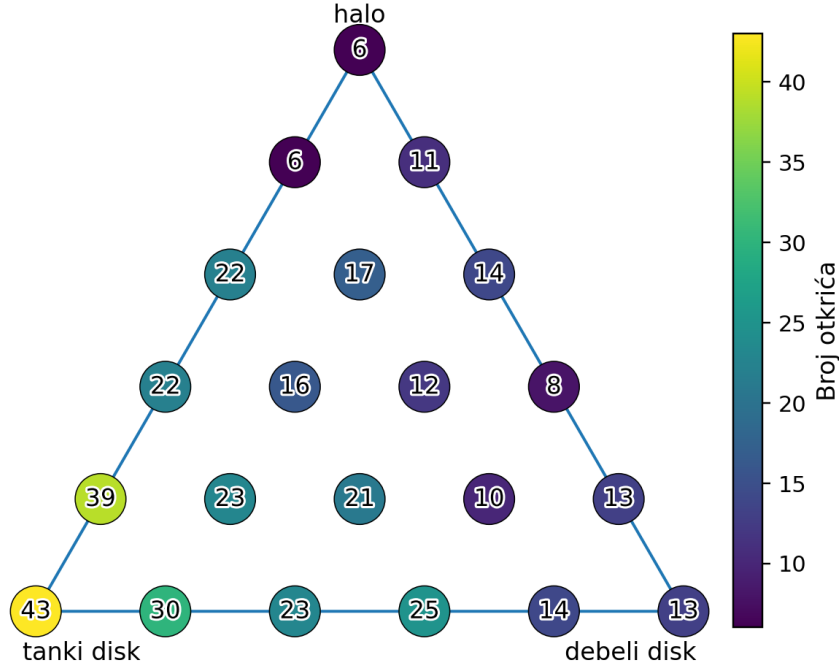
objekte haloa. Rezultati zato pokazuju izraženu razliku u detektabilnosti pojedinačnih objekata u zavisnosti od njihovih kinematičkih karakteristika.

Ovaj efekat je posebno značajan kada se uporedi sa očekivanim kinematičkim sastavom objekata koji ulaze u Sunčev sistem. Eubanks i dr. [9], koristeći raspodelu brzina zvezda u okolini Sunca kao aproksimaciju raspodele brzina ISO, procenjuju da oko 92% dolaznih objekata pripada populaciji tankog diska i oko 6% populaciji debelog diska, dok se iz haloa očekuje približno jedan objekat u deceniji. Dakle, objekti debelog diska, a naročito haloa, ne samo da bi trebalo da budu znatno ređi među ISO koji ulaze u Sunčev sistem, već rezultati ovog rada pokazuju da bi, čak i pri istom dolaznom fluksu, oni imali i manju verovatnoću da budu detektovani tokom svog prolaska kroz Sunčev sistem.

Do sada prikazani rezultati posmatraju zbir otkrića svake komponente kroz celu mrežu simuliranih populacija, ali koristan uvid u uticaj kinematike nam pruža i razmatranje kako postepeno pomeranje kinematičkog sastava populacije od jedne galaktičke komponente ka drugoj menja broj otkrića. To je prikazano na slici 4.13 za Sosa–Fernándezov model sa $\alpha = -2.5$. Tri ugla trougla predstavljaju čiste populacije tankog diska, debelog diska i haloa, dok tačke između njih predstavljaju njihove različite procentualne kombinacije, a broj unutar svake tačke govori koliko je objekata otkriveno za tu kombinaciju kinematika.

Čista populacija tankog diska u ovom slučaju daje 43 otkrivena objekta, čista populacija debelog diska 13, a čista halo populacija 6. Kroz unutrašnjost kinematičkog trougla se vidi jasan opšti trend da sastavi sa većim udelom tankog diska uglavnom daju više otkrića, dok se broj smanjuje prema delu prostora gde je zastupljen galaktički halo. Kod neaktivnih populacija ovaj efekat je teže uočiti u pojedinačnim simulacijama, prvenstveno zbog malog ukupnog broja otkrića. Ipak, kod najbolje popunjenih neaktivnih modela naslućuje se isti trend, što ukazuje na to da uticaj kinematike nije ograničen na tri idealizovane čiste populacije, i da promena relativnog udela komponenti takođe menja i broj objekata koje LSST uspešno otkriva.

Ovaj rezultat je važan i za tumačenje neponderisanih srednjih vrednosti broja otkrića koje su korišćene u prethodnim poređenjima. U tim poređenjima je svaki od 21 ispitanog kinematičkog sastava imao jednaku težinu, dok se među ISO koji ulaze u Sunčev sistem očekuje znatna dominacija objekata sa kinematikom tankog diska. Pošto sastavi sa većim udelom tankog diska u simulacijama uglavnom daju više otkrića, korišćenje realističnijih udela komponenti verovatno bi dalo veći broj otkrića od ravnopravnog proseka korišćenog u prethodnim sekcijama. Ove proseke



Slika 4.13: Broj otkrivenih objekata za svaki od 21 simuliranog kinematičkog sastava populacije koja koristi Sosa–Fernándezov model pri $\alpha = -2.5$. Položaj tačke određuje relativne udele tankog diska, debelog diska i galaktičkog haloa, dok broj unutar tačke predstavlja broj otkrivenih objekata.

zato ne treba tumačiti kao nominalnu prognozu za stvarnu ISO populaciju.

Na kraju, za fiksnu kombinaciju nagiba SFD-a i fotometrijskog modela, moguće je proceniti i kako se kinematički sastav populacije preslikava na sastav skupa objekata koje LSST uspešno otkriva. Za to je potrebno broj otkrića svake komponente normalizovati njenim ukupnim udelom kroz kinematičku mrežu. Ako je K_{rjc} broj otkrivenih objekata komponente c u kinematičkom sastavu j i realizaciji r , a f_{jc} njen udeo u tom sastavu, definišemo

$$\hat{\lambda}_c = \frac{\sum_{r,j} K_{rjc}}{\sum_{r,j} f_{jc}}, \quad (4.4.1)$$

gde j indeksira kinematičke sastave, a r nezavisne realizacije. Za jednu kompletnu mrežu važi

$$\sum_j f_{j,\text{thin}} = \sum_j f_{j,\text{thick}} = \sum_j f_{j,\text{halo}} = 7, \quad (4.4.2)$$

pa imenilac u jednačini 4.4.1 iznosi 7 za jednu, odnosno 14 za dve nezavisne realizacije. Na ovaj način se $\hat{\lambda}_c$ može tumačiti kao očekivani broj otkrića kada bi čitava

populacija pripadala samo komponenti c , procenjen korišćenjem informacija iz cele kinematičke mreže.

Ako su udeli svake komponente u ukupnoj brojnoj gustini populacije f_{thin} , f_{thick} i f_{halo} , očekivani broj otkrića može se zapisati kao

$$\lambda(\mathbf{f}) = f_{\text{thin}}\hat{\lambda}_{\text{thin}} + f_{\text{thick}}\hat{\lambda}_{\text{thick}} + f_{\text{halo}}\hat{\lambda}_{\text{halo}}. \quad (4.4.3)$$

Pošto objekte iz ove tri komponente nije podjednako lako detektovati, njihov odnos među otkrićima generalno neće biti jednak njihovom odnosu u ulaznoj populaciji. Za komponentu c očekivani udeo među otkrivenim objektima iznosi

$$f_{c,\text{det}} = \frac{f_c\hat{\lambda}_c}{f_{\text{thin}}\hat{\lambda}_{\text{thin}} + f_{\text{thick}}\hat{\lambda}_{\text{thick}} + f_{\text{halo}}\hat{\lambda}_{\text{halo}}}. \quad (4.4.4)$$

Na primer, za Sosa–Fernándezov model sa $\alpha = -2.5$ iz čitave kinematičke mreže dobijaju se $\hat{\lambda}_{\text{thin}} \simeq 34.6$, $\hat{\lambda}_{\text{thick}} \simeq 13.0$ i $\hat{\lambda}_{\text{halo}} \simeq 7.9$.

Hipotetička ulazna populacija sa jednakim udelima sve tri komponente zato ne bi dala ni približno jednak sastav skupa otkrivenih objekata, već bi on sadržao približno 62% objekata tankog diska, 24% objekata debelog diska i 14% halo objekata.

Kinematička selekcija na taj način deluje u istom smeru kao i očekivana intrinzična dominacija tankog diska. Komponenta za koju se očekuje da bude najbrojnija među ISO koji ulaze u Sunčev sistem ujedno je i najpovoljnija za detekciju. Zbog toga relativna zastupljenost objekata tankog diska, debelog diska i haloa među budućim LSST otkrićima ne mora direktno odgovarati njihovom odnosu u stvarnoj populaciji međuzvezdanih objekata.

Jačina ove selekcije, međutim, nije ista u celom prostoru parametara. Razlike između kinematičkih komponenti najveće su kod populacija u kojima značajan deo otkrića čine mali objekti, dok se ograničavanjem uzorka na veće prečnike ove razlike primetno smanjuju. Zbog toga je u narednoj sekciji detaljnije razmotreno kako veličina, brzina i uslovi posmatranja utiču na to koji objekti će biti uspešno otkriveni.

4.5 Selekcione pristrasnosti LSST pregleda neba

U prethodnim sekcijama su često diskutovani efekti koji se drugačije ispoljavaju na objektima različitih veličina, što ukazuje na to da skup otkrivenih objekata može značajno da se razlikuje od početne sintetičke populacije. Zato je cilj ove sekcije

da prikaže neke selekzione efekte koji određuju koje će simulirane objekte LSST uspešno otkriti, a koje ne.

Kao što je opisano u sekciji 3.6, za svaku konfiguraciju poznati su ukupni brojevi generisanih objekata, objekata koji su prošli predfilter i konačnih otkrića. Međutim, orbitalni elementi i prečnici objekata koji nisu prošli predfilter nisu sačuvani, i zbog toga se u analizama koje zahtevaju raspodele ovih karakteristika umesto generisane populacije koriste samo objekti koji su uspešno prošli predfilter, odnosno objekti koji su prosleđeni simulatoru SORCHA. Shodno tome, ove analize ne predstavljaju ukupnu efikasnost LSST pregleda neba, ali poređenje objekata koji su prošli predfilter i uspešno otkrivenih objekata i dalje omogućava da se izdvoje selekcionirani efekti samog LSST pregleda.

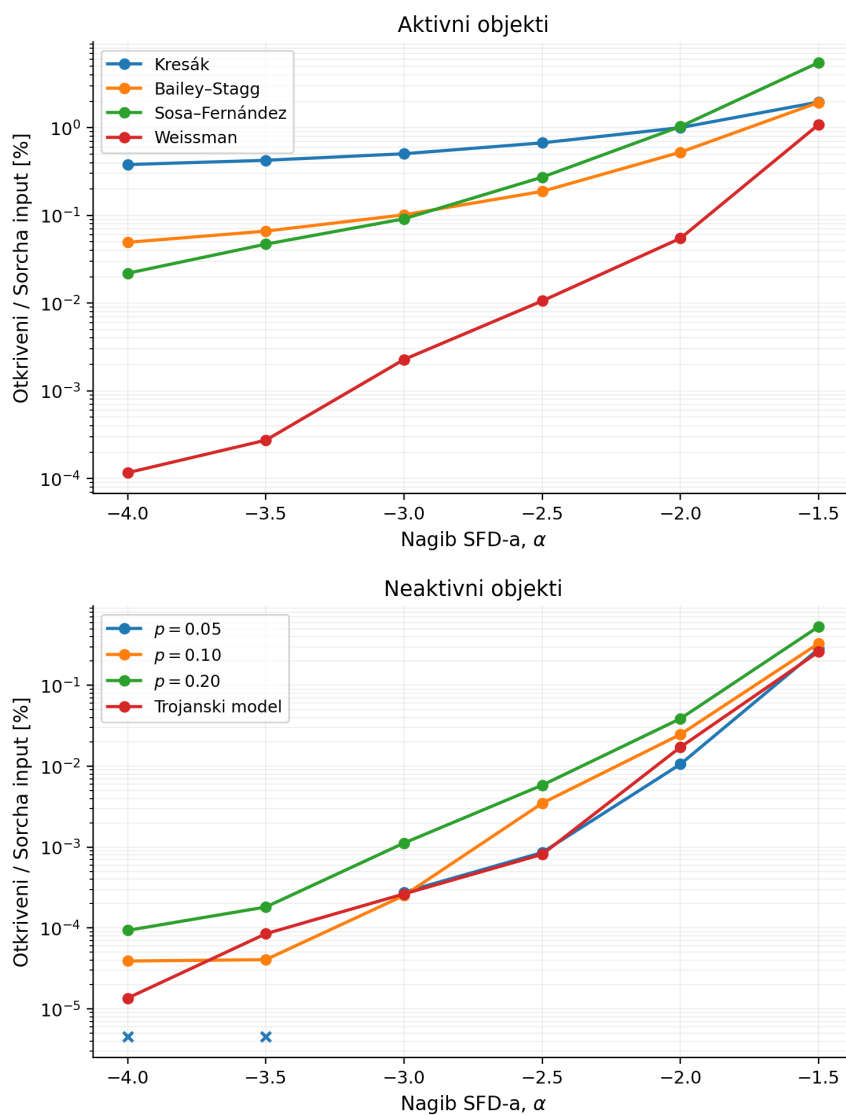
Selekcija prema veličini i kinematici

Na slici 4.14 prikazana je zavisnost udela objekata prosleđenih simulatoru SORCHA koji zadovoljavaju kriterijume otkrića od nagiba SFD-a. Za svaki nagib objedinjeni su rezultati svih kinematičkih sastava, odvojeno za svaki fotometrijski model. Kod neaktivnih objekata objedinjene su i obe nezavisne realizacije.

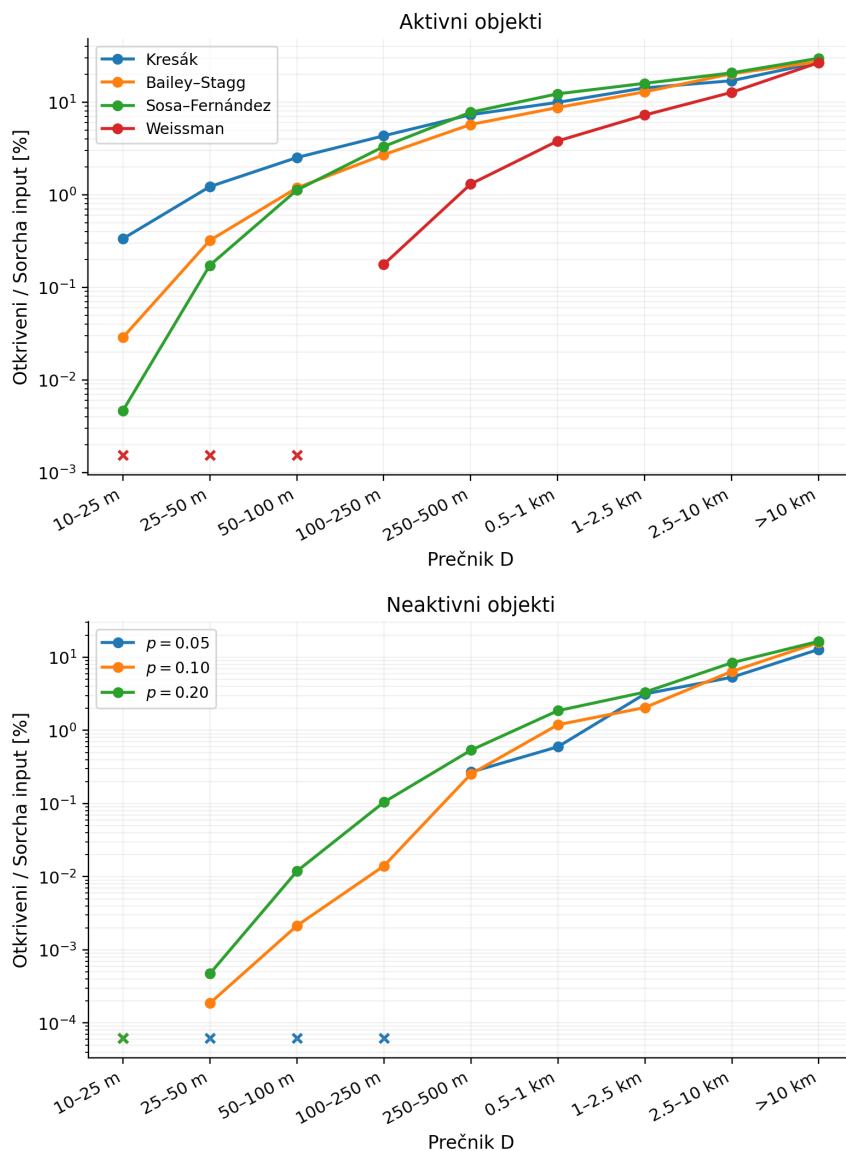
Kod svih modela udeo otkrivenih objekata brzo opada prema strmijim SFD-ovima. Na primer, za Sosa–Fernándezov model kriterijume otkrića zadovoljava oko 5.5% objekata koji su prošli predfilter pri $\alpha = -1.5$, dok pri $\alpha = -4.0$ ovaj udeo pada na samo 0.022%, odnosno približno 250 puta. Kod neaktivnog modela sa $p = 0.20$ odgovarajuće vrednosti su oko 0.53% i $9.3 \times 10^{-5}\%$, što predstavlja smanjenje za približno faktor 5.7×10^3 . U prethodnim sekcijama već je pokazano da strmiji SFD-ovi daju mnogo veći broj malih objekata, pa dobijeni pad udela otkrića zato ukazuje na to da mali objekti, čak i kada su potencijalno detektabilni, ređe zadovoljavaju kriterijume otkrića.

Ova zavisnost se može proveriti direktno razdvajanjem objekata prema prečniku. Na slici 4.15 je za svaki fotometrijski model prikazano kako se udeo otkrivenih objekata menja sa povećanjem prečnika. Za svaki fotometrijski model objedinjeni su objekti iz svih razmatranih nagiba SFD-a i svih kinematičkih sastava.

Udeo otkrivenih snažno raste sa prečnikom kod svih prikazanih modela. Na primer, kod Sosa–Fernándezovog modela kriterijume otkrića zadovoljava samo oko $4.7 \times 10^{-3}\%$ objekata u intervalu 10–25 m i oko 1.1% objekata od 50 do 100 m. Ovaj udeo raste na 12.3% za objekte od 0.5 do 1 km i na skoro 30% za objekte veće od 10 km. Kod neaktivnih populacija ispod 100 m dobijeno je veoma malo ili



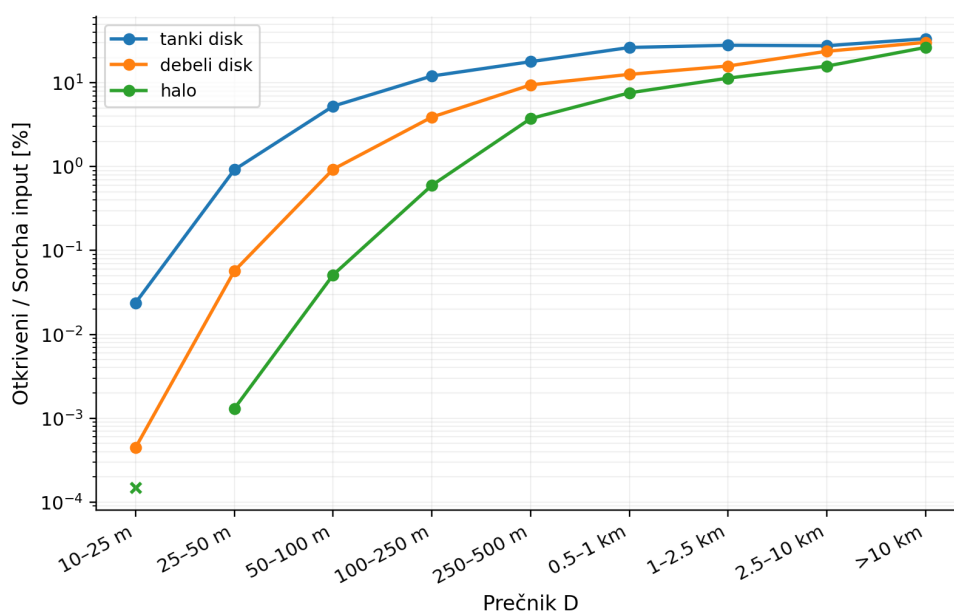
Slika 4.14: Udeo simuliranih objekata koji zadovoljavaju kriterijume otkrića u zavisnosti od nagiba SFD-a, za aktivne (gore) i neaktivne objekte (dole). Za svaki fotometrijski model objedinjeni su rezultati svih ispitanih kinematičkih sastava.



Slika 4.15: Udeo objekata prosleđenih simulatoru SORCHA koji zadovoljavaju kriterijume otkrića, u zavisnosti od prečnika, za aktivne (gore) i neaktivne objekte (dole). Za svaki fotometrijski model objedinjeni su svi razmatrani nagibi SFD-a i svi kinematički sastavi. Empirijski model albedu nije prikazan jer za njega nisu dostupni prečnici pojedinačnih objekata.

nula otkrića, dok za objekte veće od 10 km udeo otkrivenih iznosi približno 13–17%, u zavisnosti od albeda. Kako veličina objekta očigledno igra ključnu ulogu u njegovoj detektabilnosti, korisno je ispitati kako se drugi selekcionni efekti menjaju sa promenom prečnika.

Kinematička selekcija pokazuje upravo takvu zavisnost od veličine, na šta su već ukazivali rezultati prethodne sekcije kroz poređenje nagiba SFD-a i jačine ovog efekta. Pošto strmiji SFD-ovi daju veći relativni broj malih objekata, ovaj rezultat je ukazivao na to da je kinematička selekcija posebno izražena kod malih objekata. Na slici 4.16 je ova pretpostavka proverena razdvajanjem objekata prema prečniku za sve konfiguracije u kojima je korišćen Sosa–Fernándezov model.

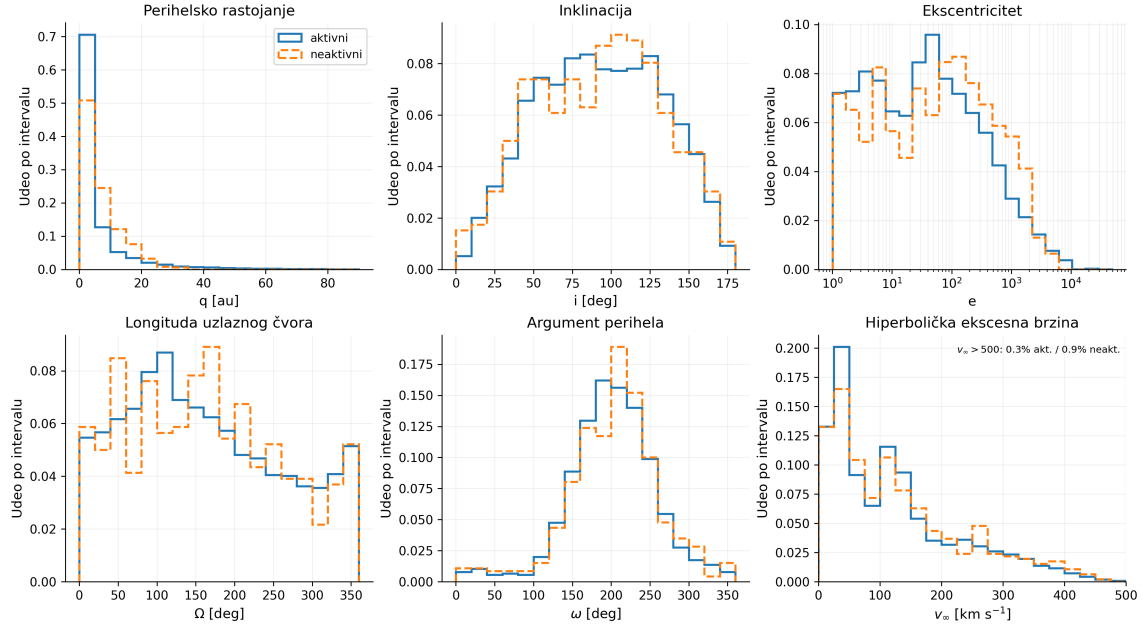


Slika 4.16: Udeo objekata prosleđenih simulatoru Sorchu koji zadovoljavaju kriterijume otkrića u zavisnosti od prečnika, za objekte sa kinematikom tankog diska, debelog diska i galaktičkog haloa u Sosa–Fernándezovom modelu. Za svaku komponentu objedinjeni su rezultati svih razmatranih nagiba SFD-a i svih kinematičkih sastava u kojima je ona prisutna.

Dobijeni rezultat potvrđuje raniju interpretaciju. U intervalu 50–100 m kriterijume otkrića zadovoljava oko 5.3% objekata tankog diska, 0.93% objekata debelog diska i samo 0.051% halo objekata, pa je udeo za tanki disk više od sto puta veći nego za halo. Kod objekata većih od 10 km odgovarajući udeli iznose 33.6%, 30.4% i 26.4%, odnosno razlikuju se za svega oko 30% između tankog diska i haloa. Kinematička selekcija zato ostaje prisutna i kod većih objekata, ali je kod najmanjih objekata znatno izraženija.

Orbitalna i posmatračka geometrija

Na slici 4.17 su prikazane raspodele orbitalnih elemenata i hiperboličke ekscesne brzine otkrivenih aktivnih i neaktivnih objekata. Pošto najmanji aktivni objekti neproporcionalno mnogo utiču na ove raspodele, za ovaj pregled izdvojeni su objekti sa $D \geq 100$ m.

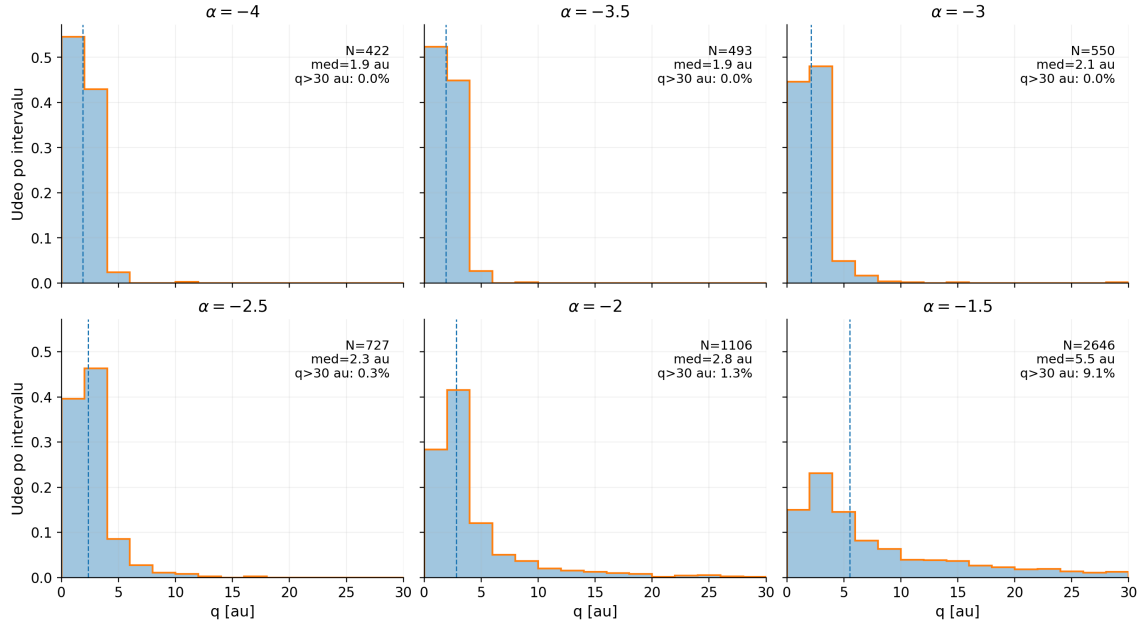


Slika 4.17: Raspodele perihelskog rastojanja, inklinacije, ekscentriciteta, longitude uzlaznog čvora, argumenta perihela i hiperboličke ekscesne brzine otkrivenih aktivnih i neaktivnih objekata sa $D \geq 100$ m.

Raspodele inklinacije i hiperboličke ekscesne brzine aktivnih i neaktivnih objekata u ovom preseku su veoma slične. Uočljivija razlika pojavljuje se kod perihelskog rastojanja, čija medijana iznosi približno 2.9 au za aktivne i 4.8 au za neaktivne objekte.

Perihelsko rastojanje aktivnih otkrivenih objekata menja se i sa nagibom SFD-a. Na slici 4.18 prikazane su raspodele q za šest razmatranih nagiba, ponovo nakon izdvajanja objekata sa $D \geq 100$ m. Za svaki nagib objedinjeni su svi modeli kometarne aktivnosti i kinematički sastavi, kako bi se izdvojila opšta zavisnost raspodele perihelskih rastojanja od nagiba SFD-a.

Prema plićim SFD-ovima raspodela se pomera ka većim perihelskim rastojanjima. Medijana q raste sa približno 1.9 au pri $\alpha = -4.0$ na oko 5.5 au pri $\alpha = -1.5$, a pri plićim SFD-ovima raspodela dobija i izraženiji rep ka većim perihelskim rastojanjima. Ovakva promena je u skladu sa raspodelom veličina objekata ovih populacija,



Slika 4.18: Raspodela perihelskog rastojanja otkrivenih aktivnih objekata sa $D \geq 100$ m za šest razmatranih nagiba SFD-a. Za svaki nagib objedinjeni su svi modeli kometarne aktivnosti i svi kinematički sastavi.

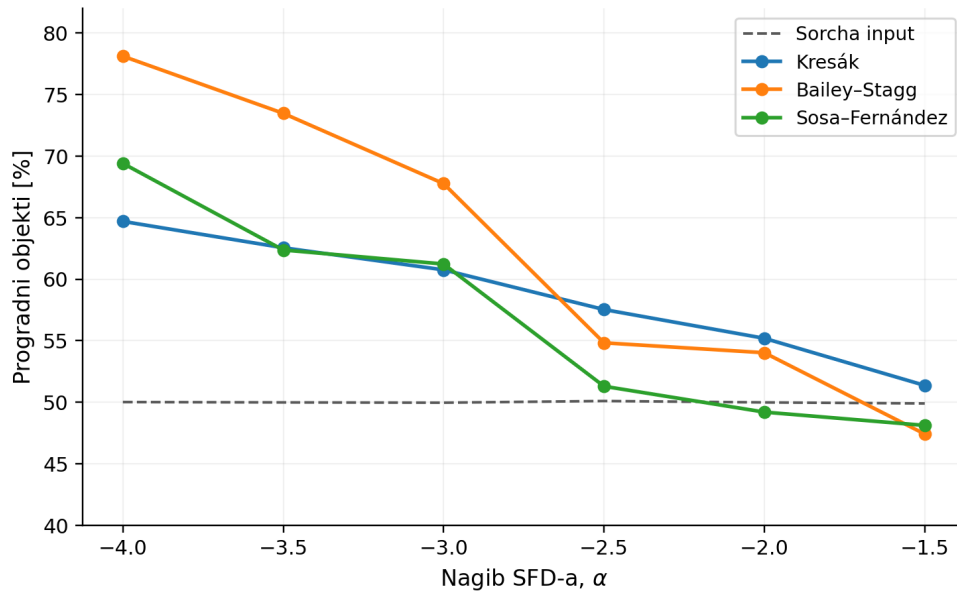
jer plići SFD-ovi daju veći relativni doprinos velikih objekata, koji mogu biti detektovani i pri većim perihelskim rastojanjima.

U originalnim sintetičkim populacijama progradne i retrogradne orbite podjednako su zastupljene, a njihov odnos se gotovo ne menja ni nakon prefiltera. Međutim, kod otkrivenih objekata se kod strmijih SFD-ova pojavljuje sve veći višak progradnih orbita, prikazan na slici 4.19.

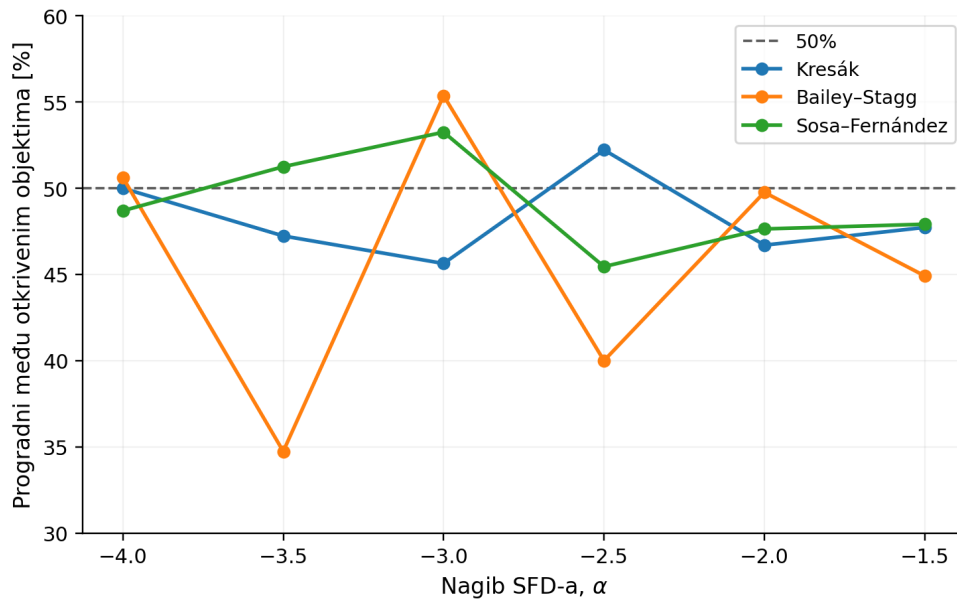
Pri $\alpha = -1.5$ udeo progradnih objekata je blizu 50% kod sva tri prikazana modela, ali pri $\alpha = -4.0$ raste na oko 65% za Kresákov, 78% za Bailey–Staggov i 69% za Sosa–Fernándezov model. Sličnu pristrasnost prema progradnim orbitama dobijaju i Dorsey i dr. [7], koji je povezuju sa dužim vremenom zadržavanja progradnih objekata u oblasti u kojoj mogu biti detektovani. Takvi objekti zato imaju više prilika da budu dovoljno puta posmatrani i da, shodno tome, zadovolje kriterijume otkrića.

Ovaj trend se, međutim, gotovo potpuno gubi kada se izdvoje samo objekti sa $D \geq 100$ m. Rezultat tog poređenja prikazan je na slici 4.20.

Kod većih objekata više se ne vidi rast udela progradnih orbita prema strmijim SFD-ovima. Kada se objedine tri prikazana modela, progradne orbite čine 47.8% objekata sa $D \geq 100$ m, što ukazuje na to da izražen progradni višak prvenstveno potiče od malih objekata.



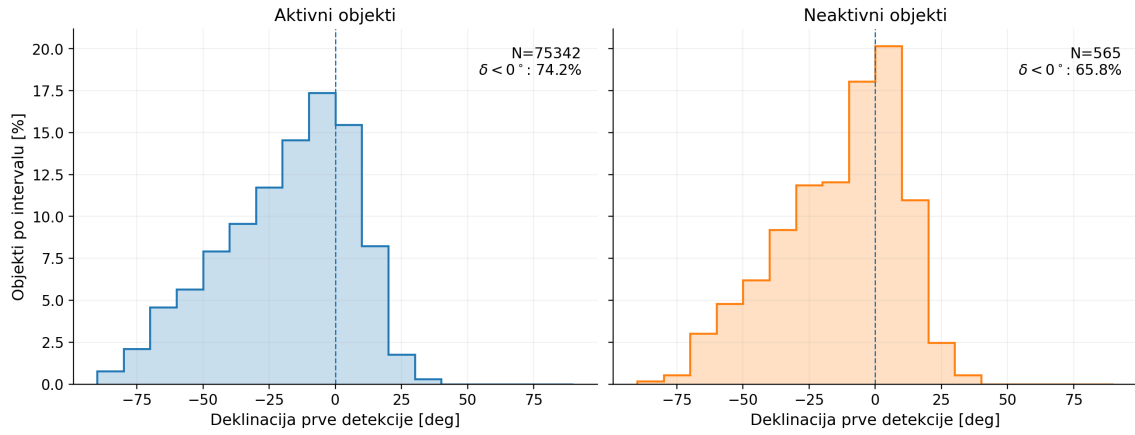
Slika 4.19: Udeo progradnih orbita među otkrivenim aktivnim objektima u zavisnosti od nagiba SFD-a. Isprekidana linija označava udeo progradnih objekata u populaciji prosledenoj simulatoru SORCHA. Weissmanov model nije prikazan zbog veoma malog broja otkrića pri strmim SFD-ovima.



Slika 4.20: Udeo progradnih orbita među otkrivenim aktivnim objektima sa $D \geq 100$ m. Isprekidana linija označava ravnomeran odnos progradnih i retrogradnih orbita od 50%. Weissmanov model nije prikazan zbog veoma malog broja otkrića pri strmim SFD-ovima.

Vremenski raspon detekcija i brzo prividno kretanje objekata

Raspodela LSST posmatranja na nebu odražava se i na položaje na kojima se pojavljuju prve detekcije otkrivenih objekata. Na slici 4.21 prikazana je deklinacija najranije sačuvane detekcije svakog konačno otkrivenog objekta. Kod aktivnih objekata 74.2% prvih detekcija nalazi se na $\delta < 0^\circ$, dok kod neaktivnih ovaj udeo iznosi 65.8%.



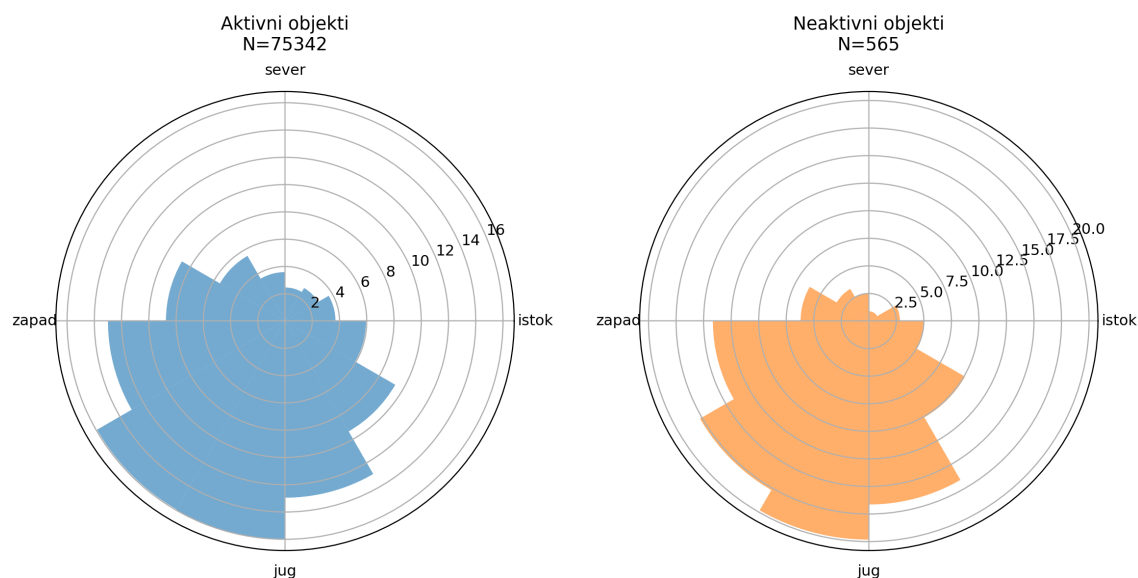
Slika 4.21: Deklinacija najranije sačuvane detekcije konačno otkrivenih aktivnih i neaktivnih objekata.

Veći udeo prvih detekcija na južnom nebu očekivan je zbog geometrije LSST pregleda, a ova asimetrija se vidi i u smeru prividnog kretanja pri prvoj detekciji, prikazanom na slici 4.22. Ugao je definisan tako da 0° odgovara kretanju ka istoku, 90° ka severu, 180° ka zapadu i 270° ka jugu.

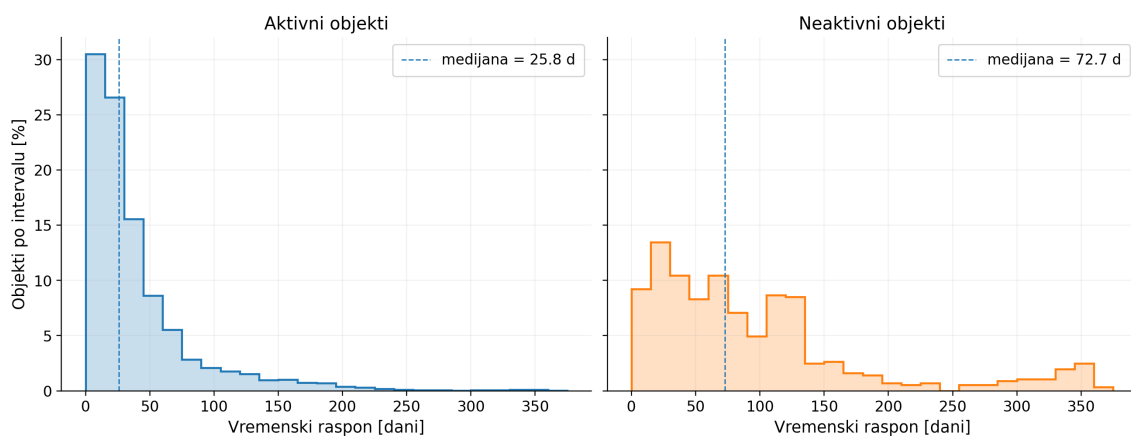
Kod 73.2% aktivnih i 83.4% neaktivnih objekata komponenta prividnog kretanja po deklinaciji je negativna, a maksimum raspodele nalazi se približno u južnom i jugozapadnom smeru. Sličan opšti smer kretanja ISO ka južnijim delovima LSST otiska dobijaju i Dorsey i dr. [7].

Za svaki otkriveni objekat izračunat je i vremenski raspon između njegove prve i poslednje sačuvane detekcije. Raspodele ove veličine prikazane su na slici 4.23. Medijana iznosi 25.8 dana za aktivne i 72.7 dana za neaktivne objekte. Kada se zadrže samo objekti sa $D \geq 100$ m, medijana za aktivne objekte raste sa 25.8 na 53.7 dana, a pri $D \geq 200$ m na 67.9 dana.

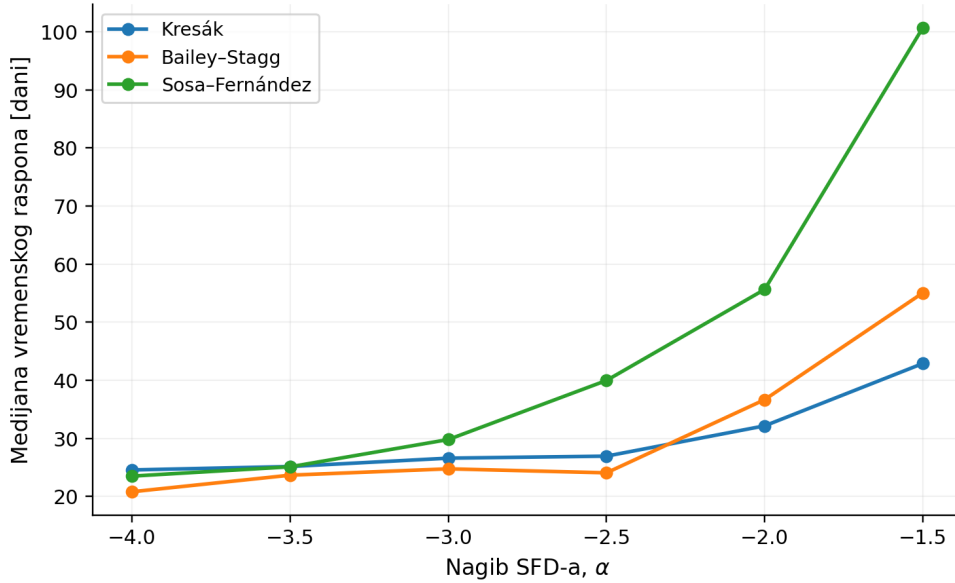
Na slici 4.24 isti raspon je prikazan u zavisnosti od nagiba SFD-a za aktivne objekte. Plići SFD-ovi uglavnom daju duže posmatračke lukove. Najjasniji primer je Sosa–Fernándezov model, kod kog medijana raste sa oko 23.5 dana pri $\alpha = -4.0$ na približno 101 dan pri $\alpha = -1.5$.



Slika 4.22: Smer prividnog kretanja pri najranijoj sačuvanoj detekciji. Svaki konačno otkriveni objekat doprinosi jednom vrednošću. Ugao 0° označava istok, 90° sever, 180° zapad, a 270° jug.



Slika 4.23: Vremenski raspon između prve i poslednje sačuvane detekcije za sve konačno otkrivene aktivne i neaktivne objekte.



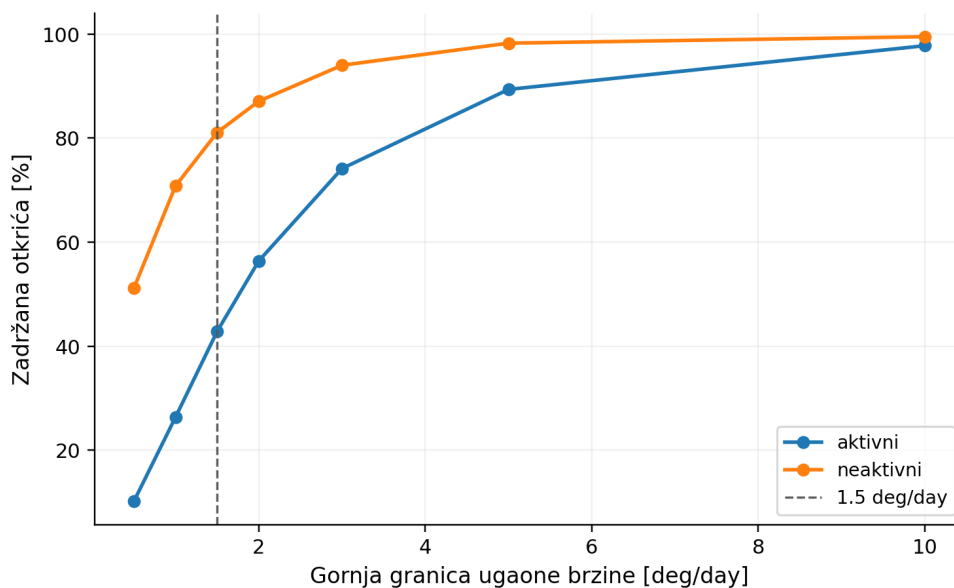
Slika 4.24: Medijana vremenskog raspona između prve i poslednje sačuvane detekcije aktivnih objekata u zavisnosti od nagiba SFD-a.

Ovaj trend je u skladu sa prethodno dobijenom jakom selekcijom prema veličini. Strmiji SFD-ovi daju veći relativni doprinos malih objekata, pa je razumno očekivati da su oni dovoljno sjajni za detekciju samo tokom kraćeg dela prolaska.

Za kraj ove sekcije je posebno ispitan i uticaj velikih prividnih ugaonih brzina. Kao što je već naglašeno u glavi 3, u Rubin Data Preview 1 je pri formiranju trackleta korišćena gornja granica od 1.5 deg day^{-1} [26], što je motivisalo proveru uticaja takve granice na rezultate ovog rada.

Izveden je jednostavan naknadni test u kom su za svaku izabranu gornju granicu najpre uklonjene pojedinačne detekcije čija prividna ugaona brzina prelazi tu granicu. Tek nakon toga su među preostalim detekcijama ponovo traženi parovi tokom iste noći sa vremenskim razmakom od maksimalno 90 minuta, a zatim je provereno kojim objektima ostaju najmanje tri takve noći unutar intervala od 15 dana. Ovaj postupak ne pokušava da reprodukuje pravi algoritam povezivanja, već služi samo kao test osetljivosti dobijenih otkrića na ovakva ograničenja. Dobijeni rezultati su prikazani na slici 4.25.

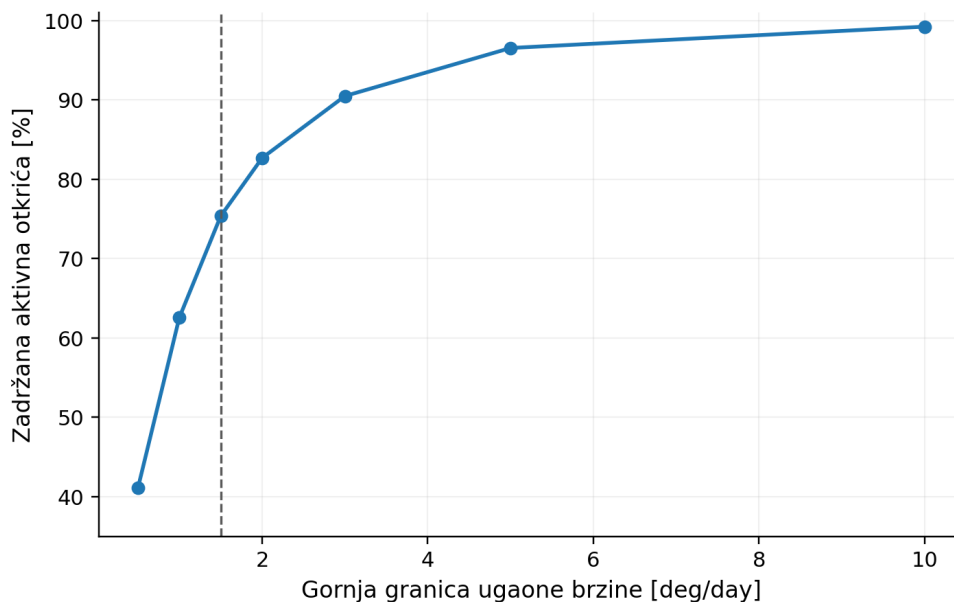
Za gornju granicu od 1.5 deg day^{-1} zadržava se 58.9% pojedinačnih detekcija aktivnih objekata, ali samo 42.8% aktivnih otkrića. Kod neaktivnih objekata odgovarajuće vrednosti iznose 90.6% detekcija i 81.1% otkrića. Gubitak pojedinačnih detekcija zato može dovesti do nesrazmernog smanjenja broja otkrića, jer objekat može ostati detektovan više puta, ali ne dovoljno često da ispuni sve potrebne kri-



Slika 4.25: Udeo otkrivenih objekata koji ostaje nakon postavljanja različitih gornjih granica prividne ugaone brzine u naknadnom testu. Vertikalna linija označava 1.5 deg day^{-1} .

terijume otkrića.

Kao dodatna provera zavisnosti ovog efekta od veličine, isti test je ponovljen i samo za aktivna otkrića sa $D \geq 100 \text{ m}$.



Slika 4.26: Udeo aktivnih otkrića sa $D \geq 100 \text{ m}$ koji ostaje nakon primene različitih gornjih granica prividne ugaone brzine. Vertikalna linija označava 1.5 deg day^{-1} .

Za $D \geq 100$ m, granicu od 1.5 deg day^{-1} zadovoljava 75.4% aktivnih otkrića, naspram 42.8% kada smo koristili sve otkrivene aktivne objekte. Ova razlika pokazuje da je osetljivost na gornju granicu ugaone brzine najvećim delom povezana sa najmanjim objektima.

Na kraju, najvažniji zaključak je da selekcionni efekti ne dovode samo do manjeg broja otkrića, već menjaju i to kakvi objekti na kraju bivaju otkriveni. Najjasnije se vidi pristrasnost prema većim objektima, ali se ona prepliće sa kinematikom, orbitalnom geometrijom i uslovima posmatranja. Razlike u detektabilnosti između kinematičkih komponenti, višak progradnih orbita i osetljivost na velike prividne ugaone brzine najizraženiji su među najmanjim objektima, dok se kod većih objekata ovi efekti značajno smanjuju. Zbog toga ni broj otkrića ni raspodele osobina otkrivenih objekata ne mogu da se tumače nezavisno od selekcije koju uvodi pregled. Ograničavanje osobina stvarne ISO populacije zato zahteva poređenje sa sintetičkim populacijama na koje su primenjeni isti uslovi posmatranja i kriterijumi otkrića.

4.6 Ograničenja modela i izvori neizvesnosti

Cilj ovog rada nije bio detaljno modelovanje jedne pretpostavljene ISO populacije, već sistematsko ispitivanje uticaja nekoliko osnovnih parametara na LSST detektabilnost. Zbog toga su varirani samo nagib SFD-a, fotometrijski model i kinematički sastav, dok su ostale osobine populacije opisane jednostavnijim fiksni pretpostavkama. Model zato ne obuhvata svu moguću fizičku raznovrsnost stvarne ISO populacije.

Jedna od važnijih pretpostavki odnosi se na raspodelu veličina. U svim simulacijama korišćen je jedan stepeni zakon kroz interval od 10 m do 100 km, iako stvarna populacija ne mora imati isti nagib kroz tako širok opseg. Ovo je naročito značajno kod strmih SFD-ova, kod kojih najmanji objekti mogu dominirati otkrivenim uzorkom aktivnih populacija. Svi rezultati su takođe normalizovani na $n_0 = 0.1 \text{ au}^{-3}$ za objekte veće od 100 m, pa apsolutni brojevi otkrića direktno zavise od ove usvojene brojne gustine.

Kod aktivnih objekata najveći dodatni izvor neizvesnosti predstavlja veza između veličine jezgra i kometarnog sjaja. U radu su korišćene četiri empirijske relacije iz Cook i dr. [4], koje daju različite procene sjaja jezgra iste veličine i time omogućavaju da se direktno ispita koliko ova pretpostavka utiče na detektabilnost. Relacije su primenjene kroz ceo simulirani interval veličina, uključujući i jezgra manja od

onih razmatranih u radu Cook i dr. [4]. Rezultate za ovaj deo populacije zato treba tumačiti sa dodatnim oprezom, posebno kod strmih SFD-ova gde najmanji objekti mogu dati veliki deo ukupnog broja otkrića. Pored toga, za sve aktivne objekte korišćen je isti fotometrijski indeks $n = 4$, bez promene pre i posle perihela. Stvarna ISO populacija može obuhvatati znatno širi raspon jačina i oblika kometarne aktivnosti, ali njihove raspodele za sada nisu dovoljno poznate da bi se pouzdano uključile u model.

Određena ograničenja postoje i kod modelovanja kinematike. Raspodele brzina međuzvezdanih objekata dobijene su iz izmerenih brzina obližnjih zvezda iz kataloga Gaia, uz pretpostavku da ISO nakon izbacivanja približno zadržavaju kinematičke karakteristike svojih matičnih sistema. Dodatna brzina koju objekat dobija prilikom izbacivanja iz planetarnog sistema nije posebno modelovana. Dobijene raspodele zavise i od izbora Gaia uzorka, načina klasifikacije zvezda i KDE aproksimacije njihovih brzina. Ova neizvesnost je najveća kod haloa, za koji je lokalni uzorak najmanji i kod kog dobijena raspodela sadrži mali visokobrzinski rep. Zbog toga je zaključak o postojanju i smeru kinematičke selekcije pouzdaniji rezultat nego tačna vrednost razlike u detektabilnosti između pojedinačnih galaktičkih komponenti.

Važno ograničenje predstavlja i to što LSST deo simulacije odgovara starijoj preoperativnoj verziji pregleda. Simulacije su izvršene pomoću paketa Sorchu verzije 0.9.2 i baze posmatranja `baseline_v4.3.5_1_year.db`, koja predstavlja jednu zastarelu realizaciju strategije posmatranja tokom prve godine pregleda. Pored toga, kriterijumi povezivanja implementirani u Sorchu ne reprodukuju stvarni postupak povezivanja detekcija među velikim brojem izvora, već proveravaju da li detekcije unapred poznatog sintetičkog objekta zadovoljavaju zadate vremenske i prostorne uslove. Nakon toga se primenjuje fiksna efikasnost povezivanja od 0.95, koja verovatno predstavlja optimističnu pretpostavku, naročito za najbrže ISO.

Analiza selekcionih efekata ograničena je i podacima sačuvanim tokom izvršavanja simulacija. Za objekte odbačene pre predfiltera nisu sačuvani orbitalni elementi i prečnici, dok za objekte koji nisu zadovoljili konačne kriterijume otkrića nisu sačuvane sve pojedinačne detekcije i međurezultati potrebni da se naknadno utvrdi u kom koraku su izgubljeni. Zbog toga se mogu porediti osobine populacije prosledene simulatoru Sorchu i konačno otkrivenog uzorka, ali se ne može potpuno razdvojiti doprinos predfiltera, nedovoljnog sjaja, geometrije posmatranja, razmazivanja signala i vremenskih kriterijuma otkrića.

Na kraju, zbog računarske zahtevnosti nije bilo moguće generisati veliki broj

nezavisnih realizacija svake kombinacije parametara. Za aktivne populacije korišćena je samo jedna potpuna realizacija, dok su za neaktivne populacije bile dostupne dve. Kod konfiguracija sa velikim brojem otkrića ovo nema veliki uticaj na uočene trendove, ali postaje važno kod neaktivnih populacija i strmih SFD-ova, gde pojedinačne konfiguracije daju svega nekoliko otkrića ili nijedno. Kako statistička neizvesnost ovih rezultata nije posebno kvantifikovana, njih treba tumačiti opreznije. U analizama za koje je bio potreban veći broj objekata objedinjene su obe dostupne realizacije neaktivnih populacija. U budućem radu bi za svaku konfiguraciju trebalo generisati veći broj nezavisnih realizacija, čime bi se moglo proceniti koliko se broj otkrića menja između nezavisnih realizacija i pouzdanije odrediti statistička neizvesnost rezultata pri malim brojevima otkrića.

Navedena ograničenja prvenstveno utiču na apsolutne vrednosti očekivanog broja otkrića i na tumačenje pojedinačnih konfiguracija. Jednostavnost korišćenih modela je delom namerna, jer uvođenje većeg broja slabo ograničenih parametara ne bi nužno dalo pouzdaniju prognozu.

Glava 5

Zaključak

U ovom radu razvijen je okvir za simuliranje otkrića međuzvezdanih objekata tokom prve godine pregleda neba Opservatorije Vera Rubin. Postojeći probabilistički generator sintetičkih ISO populacija proširen je tako da omogućava efikasno generisanje stacionarnih populacija tokom zadatog vremenskog intervala i korišćenje proizvoljnih empirijskih kinematičkih raspodela. Na taj način bilo je moguće sprovesti sistematsko pretraživanje prostora parametara i ispitati kako raspodela veličina, fotometrijske osobine i kinematički sastav populacije utiču na broj i osobine objekata koje bi LSST mogao da otkrije.

Za kvantitativne procene u nastavku korišćen je optimističan, ali fizički motivisan referentni scenario u kojem čitava ISO populacija ima kinematiku tankog diska. Iako relativni udeli tankog diska, debelog diska i haloa u stvarnoj ISO populaciji nisu empirijski poznati, postojeće procene ukazuju na izrazitu dominaciju tankog diska. Pošto su objekti tankog diska u simulacijama ujedno imali i najveću detektabilnost, slučaj čiste populacije tankog diska predstavlja blago optimističnu aproksimaciju očekivanog broja otkrića.

Najznačajniji rezultati rada mogu se sumirati na sledeći način:

- Za neaktivne međuzvezdane objekte dobijen je mali broj očekivanih otkrića. Od 24 ispitane kombinacije nagiba SFD-a i albeda, u ovom scenariju 19 daje manje od jednog očekivanog otkrića, dok se za preostalih pet dobijaju vrednosti između 1.36 i 4.64. Pri usvojenoj brojnoj gustini se zato tokom prve godine LSST-a očekuje najviše nekoliko neaktivnih ISO, pri čemu je za veliki deo ispitnog prostora parametara sasvim moguć i izostanak otkrića.
- Kod aktivnih objekata, kada se analiza ograniči na $D \geq 200$ m, od ukupno 24

kombinacije četiri modela aktivnosti i šest nagiba SFD-a, u istom scenariju tankog diska pet daje manje od jednog očekivanog otkrića, osamnaest daje vrednosti između 1.86 i 23.0, dok jedna posebno povoljna kombinacija dostiže 67.3. Svih pet slučajeva sa očekivanjem manjim od jednog objekta pripada Weissmanovom modelu, što pokazuje da čak i unutar razmatranih modela aktivne populacije očekivani broj otkrića može ostati veoma mali. Za većinu ispitnog prostora parametara rezultat je ipak reda nekoliko do nekoliko desetina dovoljno velikih aktivnih ISO tokom prve godine LSST pregleda.

- Naizgled različita zavisnost broja otkrića od SFD-a kod aktivnih i neaktivnih populacija svodi se na isti osnovni trend kada se iz analize isključe najmanja aktivna jezgra. Kod neaktivnih objekata smanjenje apsolutne vrednosti nagiba SFD-a dosledno daje više otkrića, a isti trend se pojavljuje i kod sva četiri modela aktivnosti kada se posmatraju objekti sa $D \geq 100$ m.
- Fotometrijske osobine pokazale su se kao jedan od najvažnijih izvora razlika u očekivanom broju otkrića. Kod aktivnih objekata različiti modeli kometarnog sjaja daju više od jednog reda veličine razlike u broju otkrića čak i kada se analiza ograniči na $D \geq 200$ m, dok kod neaktivnih objekata veći albedo sistematski povećava detektabilnost. Izbor fotometrijskog modela pritom utiče i na raspodelu veličina otkrivenih objekata, a ne samo na njihov ukupan broj.
- Prečnik objekta pokazao se kao ključna promenljiva koja povezuje više selekcionih efekata. Razlike u detektabilnosti između kinematičkih komponenti i osetljivost na velike prividne ugaone brzine najizraženije su kod najmanjih objekata, koji ujedno imaju i kraće vremenske raspone detekcija. Zbog toga SFD ne određuje samo relativan broj objekata različitih veličina, već utiče i na jačinu drugih selekcionih efekata u otkrivenom uzorku.
- Dobijena je jasna kinematička selekcija u korist objekata tankog diska. Kada se broj otkrića normalizuje brojem generisanih objekata, objekti sa kinematikom tankog diska u proseku su približno četiri puta češće otkriveni od halo objekata, dok je među objektima koji su prošli prefilter ova razlika približno faktor pet. Isti redosled detektabilnosti, tanki disk – debeli disk – halo, nezavisno se pojavljuje i u obe realizacije neaktivnih populacija. Zbog toga sastav otkrivenog uzorka neće neposredno predstavljati stvarne relativne udele ovih galaktičkih komponenti u ISO populaciji.

- Ograničenja koja dovode do gubitka pojedinačnih detekcija mogu imati još veći uticaj na broj konačnih otkrića. U testu sa gornjom granicom ugaone brzine od 1.5 deg day^{-1} zadržano je 58.9% pojedinačnih detekcija aktivnih objekata, ali samo 42.8% konačnih otkrića. Čak i kada se posmatraju samo objekti veći od 100 m, zadržava se 75.4% otkrića. Efikasnost detektovanja i povezivanja brzih objekata zato može imati znatno veći uticaj na konačan broj otkrića nego što bi se zaključilo samo iz gubitka pojedinačnih detekcija, posebno kod najmanjih objekata.
- Selekcija može da proizvede prividne veze između fizičkih, orbitalnih i posmatračkih osobina koje ne predstavljaju neposredno osobine intrinzične populacije. Promena SFD-a, odnosno samo relativne zastupljenosti objekata različitih veličina, menja i raspodelu perihelskih rastojanja, udeo progradnih orbita i vremenski raspon detekcija. Posmatrane raspodele ovih osobina zato se ne mogu tumačiti nezavisno od selekcije prema veličini.

Rezultati ovog rada zato pokazuju da će za interpretaciju budućih otkrića međuzvezdanih objekata biti potrebno posmatrati broj i osobine otkrivenih objekata zajedno i uzeti u obzir selekciju koju uvodi sam pregled. Različite kombinacije SFD-a, fotometrijskih osobina i kinematike mogu dati sličan broj otkrića, dok istovremeno mogu proizvesti različite osobine otkrivenog uzorka. Ograničavanje stvarne ISO populacije zato će zahtevati poređenje posmatranja sa sintetičkim populacijama na koje su primenjeni isti uslovi posmatranja i kriterijumi otkrića. Okvir razvijen u ovom radu omogućava upravo takvo direktno modelovanje i može se dalje proširivati kako budu dostupni bolji modeli ISO populacije, stvarni podaci LSST-a i podaci drugih velikih pregleda neba.

Literatura

- [1] T. Bensby, S. Feltzing i I. Lundström. „Elemental Abundance Trends in the Galactic Thin and Thick Disks as Traced by Nearby F and G Dwarf Stars”. U: *Astronomy & Astrophysics* 410.2 (Nov. 2003), str. 527–551. ISSN: 0004-6361, 1432-0746. DOI: 10.1051/0004-6361:20031213.
- [2] Edward Bowell i dr. „Application of Photometric Models to Asteroids”. U: *Asteroids II*. Ur. Richard P. Binzel, Tom Gehrels i Mildred Shapley Matthews. Tucson: University of Arizona Press, 1989, str. 524–556.
- [3] Colin Orion Chandler i dr. „NSF-DOE Vera C. Rubin Observatory Observations of Interstellar Comet 3I/ATLAS (C/2025 N1)”. U: *The Astrophysical Journal Letters* 1001.2 (Apr. 2026), str. L35. ISSN: 2041-8205, 2041-8213. DOI: 10.3847/2041-8213/ae4b3a. arXiv: 2507.13409 [astro-ph.EP].
- [4] Nathaniel V. Cook i dr. „REALISTIC DETECTABILITY OF CLOSE INTERSTELLAR COMETS”. U: *The Astrophysical Journal* 825.1 (Jul 2016), str. 51. ISSN: 0004-637X, 1538-4357. DOI: 10.3847/0004-637X/825/1/51.
- [5] Martin Cordiner i dr. „Isotopic Evidence for a Cold and Distant Origin of the Interstellar Object 3I/ATLAS”. U: (Mar. 2026). DOI: 10.21203/rs.3.rs-8930056/v1. arXiv: 2603.06911 [astro-ph.EP].
- [6] Martin A. Cordiner i dr. „JWST Detection of a Carbon Dioxide Dominated Gas Coma Surrounding Interstellar Object 3I/ATLAS”. U: (Sept. 2025). DOI: 10.48550/arXiv.2508.18209. arXiv: 2508.18209 [astro-ph.EP].
- [7] Rosemary C. Dorsey i dr. „The Visibility of the Ōtautahi–Oxford Interstellar Object Population Model in LSST”. U: *The Planetary Science Journal* 6.9 (Sept. 2025), str. 214. ISSN: 2632-3338. DOI: 10.3847/PSJ/adf8ca.

- [8] Toni Engelhardt i dr. „An Observational Upper Limit on the Interstellar Number Density of Asteroids and Comets”. U: *The Astronomical Journal* 153.3 (Mar. 2017), str. 133. ISSN: 0004-6256, 1538-3881. DOI: 10.3847/1538-3881/aa5c8a.
- [9] T. Marshall Eubanks i dr. „Interstellar Objects in the Solar System: 1. Isotropic Kinematics from the Gaia Early Data Release 3”. U: (Mar. 2021). DOI: 10.48550/arXiv.2103.03289. arXiv: 2103.03289 [astro-ph.EP].
- [10] Carson Ezell i Abraham Loeb. „Detection Rate of <50-Meter Interstellar Objects with LSST”. U: arXiv:2303.14766 (Mar. 2023). DOI: 10.48550/arXiv.2303.14766. arXiv: 2303.14766 [astro-ph.IM].
- [11] T. Grav i dr. „WISE / NEOWISE OBSERVATIONS OF THE JOVIAN TROJAN POPULATION: TAXONOMY”. U: *The Astrophysical Journal* 759.1 (Nov. 2012), str. 49. ISSN: 0004-637X, 1538-4357. DOI: 10.1088/0004-637X/759/1/49.
- [12] Alan W. Harris i Alan W. Harris. „On the Revision of Radiometric Albedos and Diameters of Asteroids”. U: *Icarus* 126.2 (Apr. 1997), str. 450–454. ISSN: 00191035. DOI: 10.1006/icar.1996.5664.
- [13] Devin J. Hoover, Darryl Z. Seligman i Matthew J. Payne. „The Population of Interstellar Objects Detectable with the LSST and Accessible for In Situ Rendezvous with Various Mission Designs”. U: *The Planetary Science Journal* 3.3 (2022), str. 71. DOI: 10.3847/PSJ/ac58fe.
- [14] Matthew J. Hopkins, Michele T. Bannister i Chris Lintott. „Predicting Interstellar Object Chemodynamics with Gaia”. U: *The Astronomical Journal* 169.2 (Feb. 2025), str. 78. ISSN: 0004-6256, 1538-3881. DOI: 10.3847/1538-3881/ad9eb3. arXiv: 2402.04904 [astro-ph.EP].
- [15] Željko Ivezić i dr. „LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products”. U: *The Astrophysical Journal* 873.2 (Mar. 2019), str. 111. ISSN: 0004-637X, 1538-4357. DOI: 10.3847/1538-4357/ab042c.
- [16] David Jewitt i Darryl Z. Seligman. „The Interstellar Interlopers”. U: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 61.1 (Avg. 2023), str. 197–236. ISSN: 0066-4146, 1545-4282. DOI: 10.1146/annurev-astro-071221-054221.

- [17] R. Lynne Jones i dr. „The Large Synoptic Survey Telescope as a Near-Earth Object Discovery Machine”. U: *Icarus* 303 (Mar. 2018), str. 181–202. ISSN: 00191035. DOI: 10.1016/j.icarus.2017.11.033. arXiv: 1711.10621 [astro-ph.EP].
- [18] Dušan Marčeta. „Synthetic Population of Interstellar Objects in the Solar System”. U: *Astronomy and Computing* 42 (Jan. 2023), str. 100690. DOI: 10.1016/j.ascom.2023.100690.
- [19] Dušan Marčeta i Darryl Z. Seligman. „Synthetic Detections of Interstellar Objects with the Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time”. U: *The Planetary Science Journal* 4.12 (Dec. 2023), str. 230. ISSN: 2632-3338. DOI: 10.3847/PSJ/ad08c1.
- [20] Stephanie R. Merritt i dr. „Sorcha: A Solar System Survey Simulator for the Legacy Survey of Space and Time”. U: *The Astronomical Journal* 170.2 (2025), str. 100. DOI: 10.3847/1538-3881/add3ec.
- [21] Joseph Murtagh i dr. „Predictions of the LSST Solar System Yield: Discovery Rates and Characterizations of Centaurs”. U: *The Astronomical Journal* 170.2 (Avg. 2025), str. 98. ISSN: 0004-6256, 1538-3881. DOI: 10.3847/1538-3881/ade1db.
- [22] Megan E. Schwamb i dr. „Tuning the Legacy Survey of Space and Time (LSST) Observing Strategy for Solar System Science”. U: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 266.2 (Jun 2023), str. 22. ISSN: 0067-0049, 1538-4365. DOI: 10.3847/1538-4365/acc173.
- [23] Darryl Z. Seligman, Dušan Marčeta i Eloy Peña-Asensio. „The Distribution of Earth-impacting Interstellar Objects”. U: *The Astrophysical Journal* 997.2, 146 (Feb. 2026), str. 146. DOI: 10.3847/1538-4357/ae2481. arXiv: 2511.03374 [astro-ph.EP].
- [24] Darryl Z. Seligman i Amaya Moro-Martín. „Interstellar Objects”. U: (Apr. 2023). DOI: 10.48550/arXiv.2304.00568. arXiv: 2304.00568 [astro-ph.EP].
- [25] Darryl Z. Seligman i dr. „Discovery and Preliminary Characterization of a Third Interstellar Object: 3I/ATLAS”. U: *The Astrophysical Journal Letters* 989.2 (Avg. 2025), str. L36. ISSN: 2041-8205, 2041-8213. DOI: 10.3847/2041-8213/adf49a.

- [26] Vera C. Rubin Observatory Team i dr. *The Vera C. Rubin Observatory Data Preview 1*. 2025. DOI: 10.71929/rubin/2570536. arXiv: 2603.23786 [astro-ph.IM].
- [27] Peter Vereš i Steven R. Chesley. „Near-Earth Object Orbit Linking with the Large Synoptic Survey Telescope”. U: *The Astronomical Journal* 154.1 (Jul 2017), str. 13. ISSN: 0004-6256, 1538-3881. DOI: 10.3847/1538-3881/aa73d0. arXiv: 1706.09397 [astro-ph.EP].

Biografija autora

Nemanja Spasojević rođen je 1. januara 2002. godine u Smederevskoj Palanci. Filološku gimnaziju u Beogradu završio je 2020. godine na smeru za japanski jezik. Nakon toga upisao je studije astronomije na Matematičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, gde je 2025. godine završio osnovne akademske studije na modulu Astroinformatika. Iste godine nastavio je školovanje na master akademskim studijama, na modulu Planetarna astronomija i astroinformatika. U okviru svog dosadašnjeg rada bavi se numeričkim simulacijama međuzvezdanih objekata.